

PMI3101 - INTRODUÇÃO À ENGENHARIA APLICADA À INDÚSTRIA MINERAL

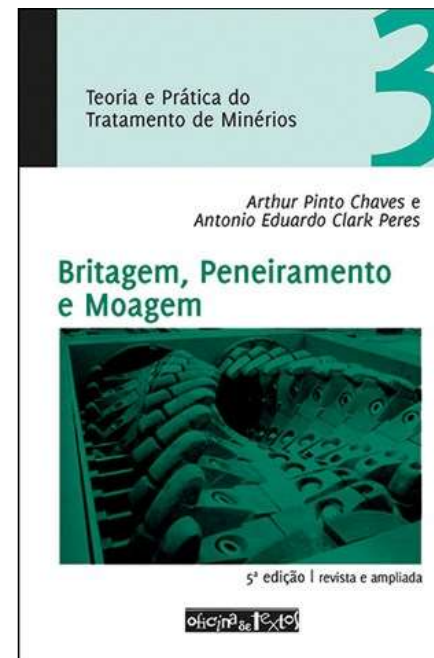
Operações unitárias – cominuição e classificação

São Paulo – 30 de abril de 2020

Professor Mauricio Guimarães Bergerman

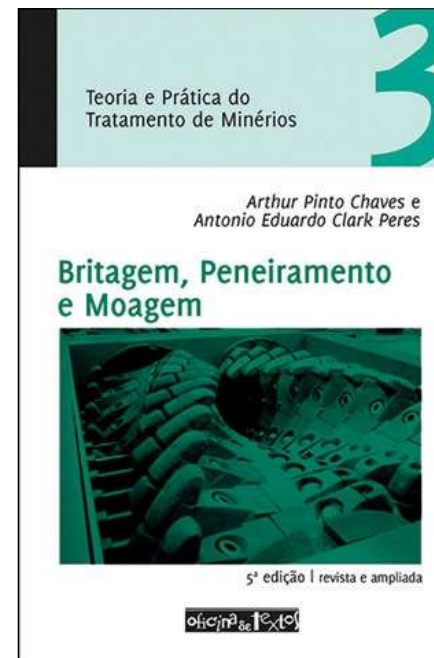
Britagem

- Capítulo 1 do livro:
- Teoria e prática do Tratamento de Minérios:
Britagem, peneiramento e moagem. Volume 3. 2012.
5 edição. Autores: Arthur Pinto Chaves e Antonio
Eduardo Clark Peres



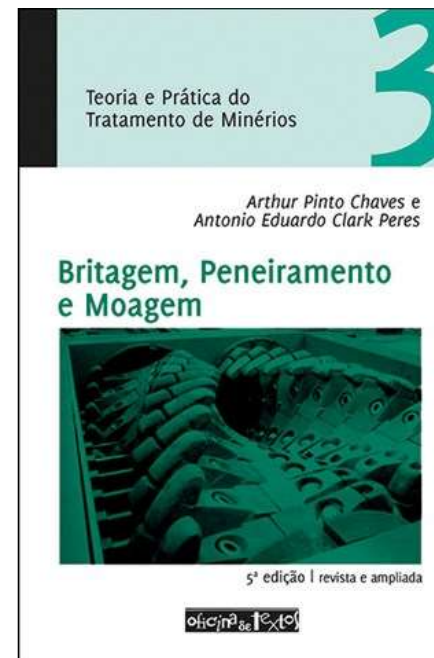
Peneiramento

- Capítulo 2 do livro:
- Teoria e prática do Tratamento de Minérios: Britagem, peneiramento e moagem. Volume 3. 2012. 5 edição. Autores: Arthur Pinto Chaves e Antônio Eduardo Clark Peres

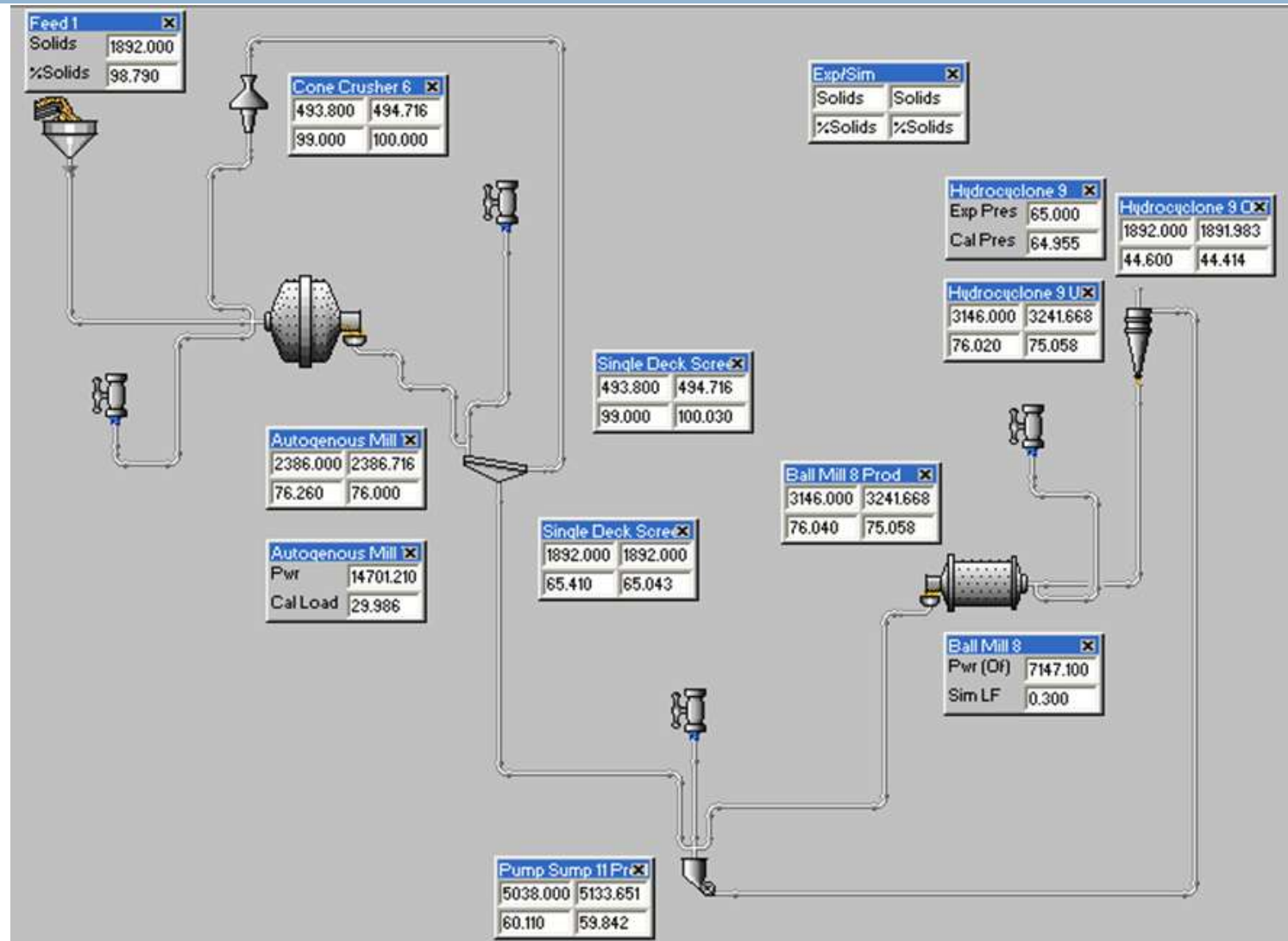


Moagem

- Capítulo 3 do livro:
- Teoria e prática do Tratamento de Minérios: Britagem, peneiramento e moagem. Volume 3. 2012. 5 edição. Autores: Arthur Pinto Chaves e Antonio Eduardo Clark Peres



Cominuição e classificação



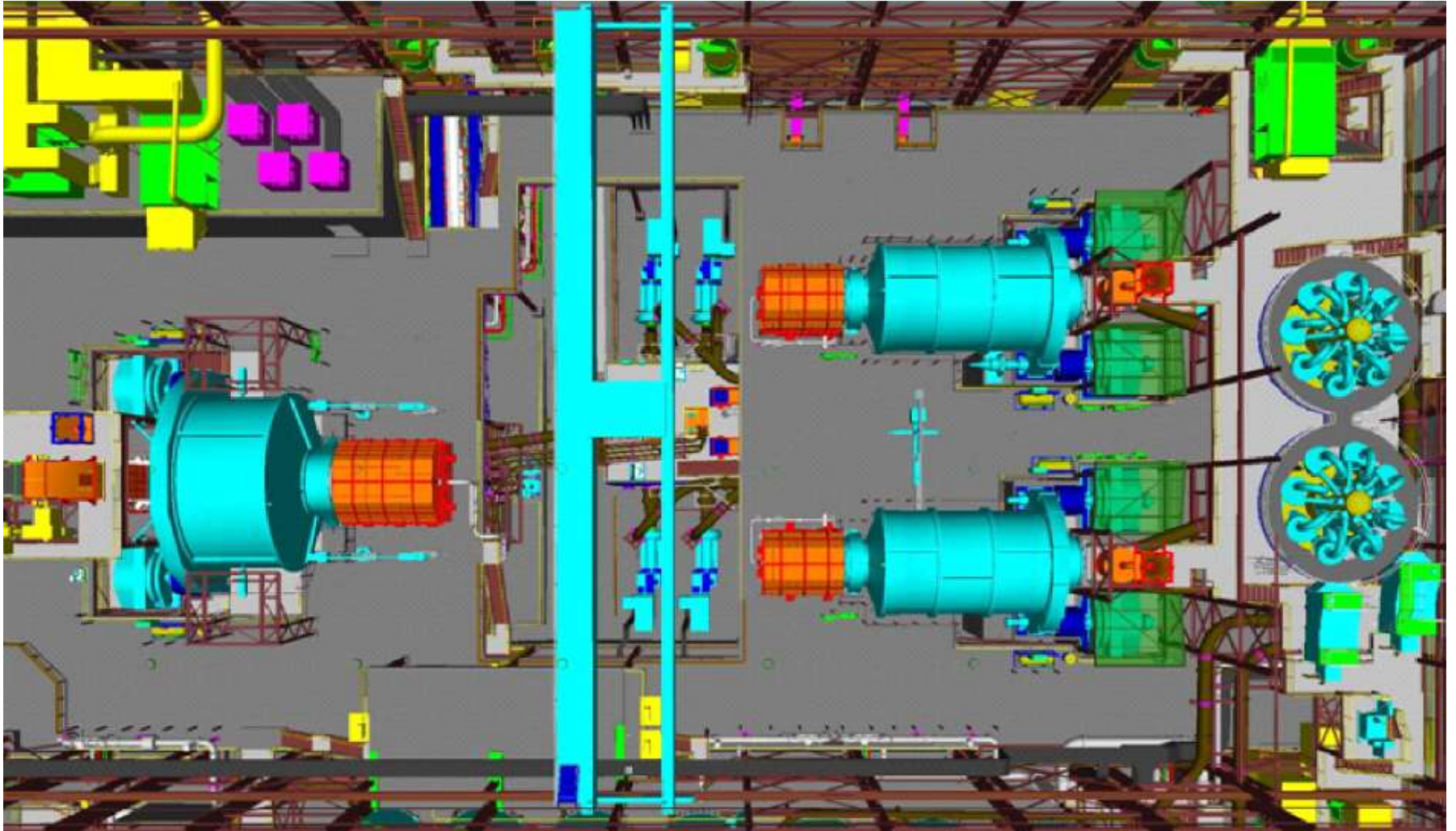
Cominuição e classificação



Cominuição e classificação



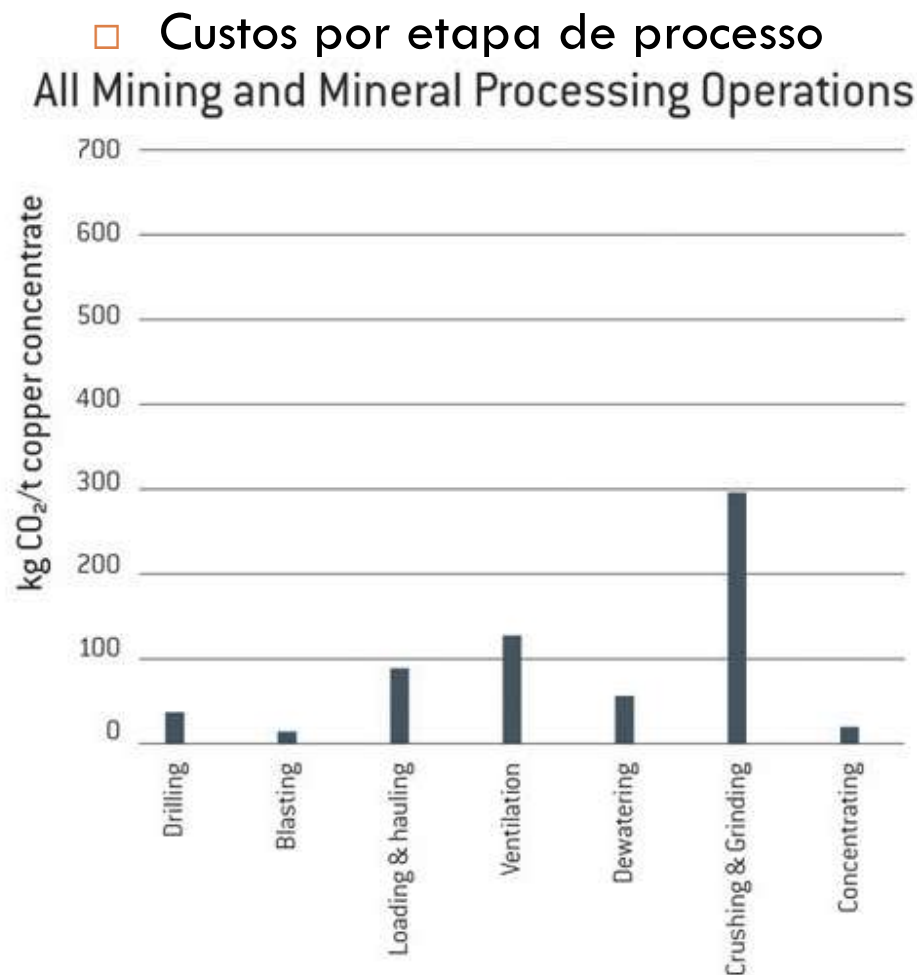
Cominuição e classificação



Cominuição e classificação

- Vídeo Mirabela

Cominuição e classificação



Posição	Commoditie	Energia (10 ⁹ kWh)
1	Minério de cobre	3,6
2	Minério de ferro	3,3
3	Minério de fosfato	1,3
4	Argila	0,5
5	Minério de titânio	0,3

Fonte: FUERSTENAU; HAN, 2003

Source: Norgate, T and Haque, N. (2010), Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations, Journal of cleaner production, Vol 18, pp 266-274.

Cominuição e classificação



Cominuição e classificação



Boddington - Newmont, Australia (right)

Cominuição e classificação

□ In pit crushing

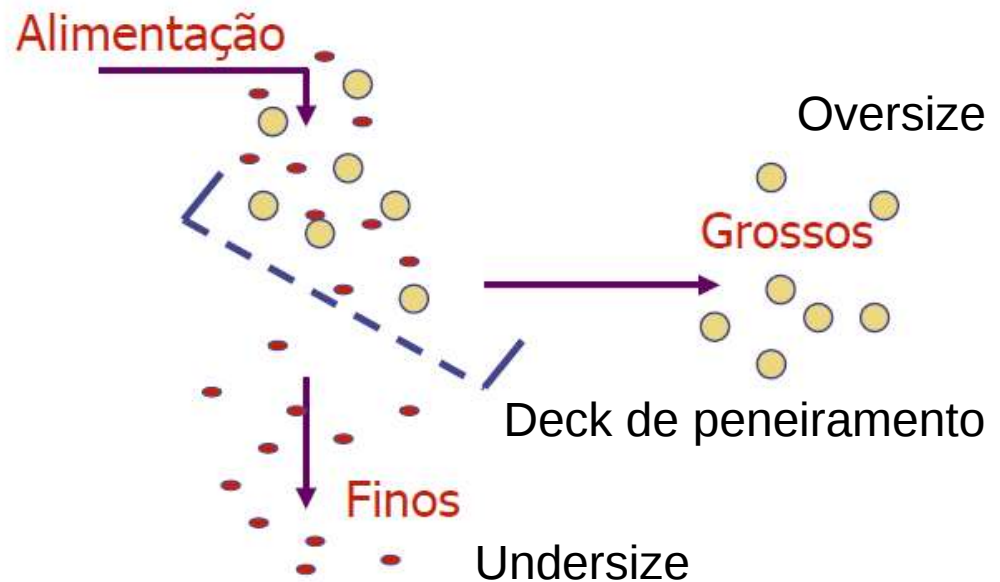
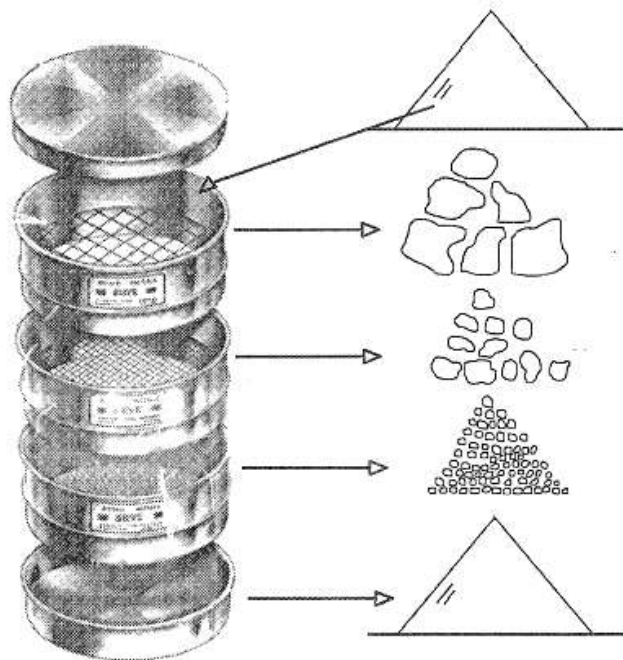


Conceitos básicos



Peneiramento

Definição: Operação de separação de uma população de partículas em duas frações de tamanhos diferentes, mediante a sua apresentação a um gabarito de abertura fixa e pré-determinada.



Peneiramento

- Faixas usuais de aplicação industrial (aprox.): 18" (0,46 m) a 100 μm ;
- A seco: material com pouca umidade natural ou que foram secados previamente – esta umidade não pode ser muito alta;
- A úmido (ou via úmida): quando o material é alimentado a forma de polpa ou recebe água adicional através de sprays dispostos sobre os decks de peneiramento.

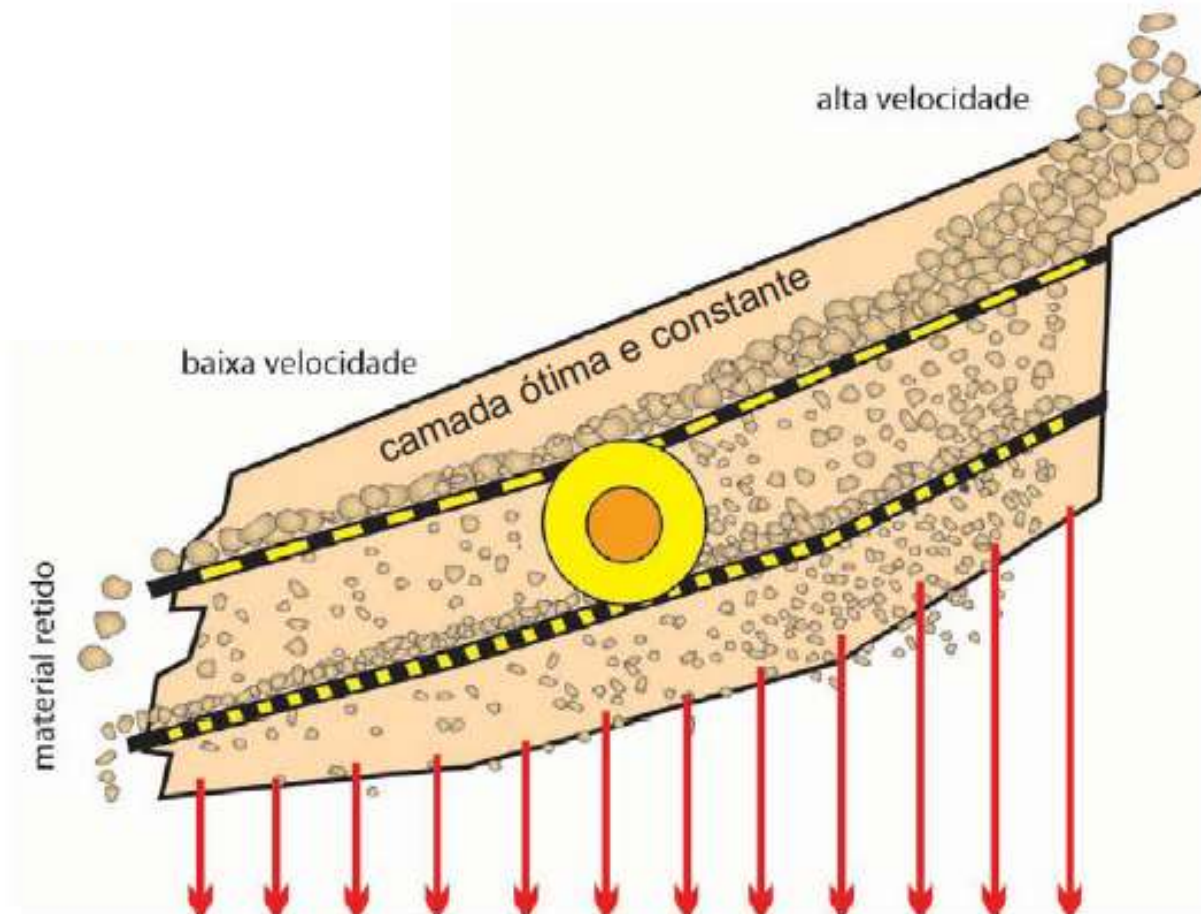
Peneiramento - equipamentos

□ Peneira vibratória inclinada:



Peneiramento - equipamentos

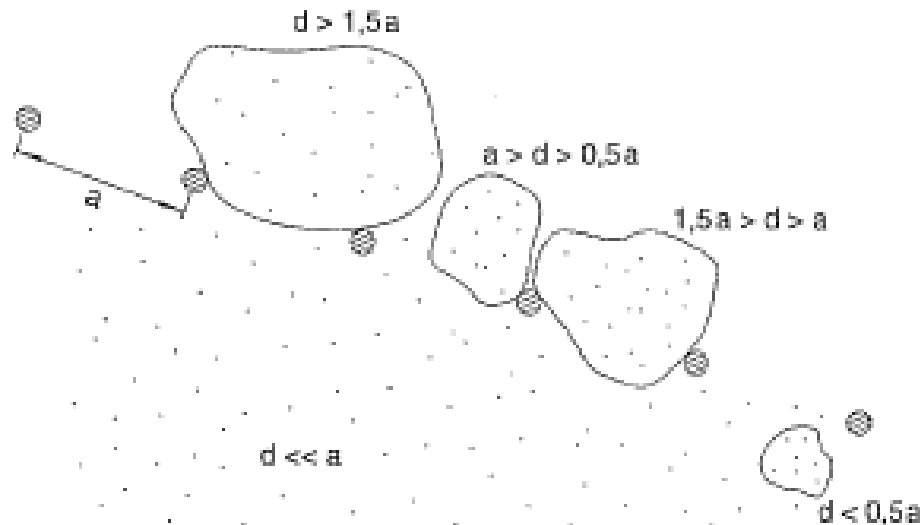
□ Peneira vibratória inclinada



Peneiramento - mecanismos

□ Comportamento individual das partículas:

- $D > 1,5 a$: Encaminhadas diretamente ao oversize;
- $1,5a > d > a$: encaminhamento ao oversize, porém pode causar o entupimento da tela;
- $a > d > 0,5a$: faixa crítica: só passa em posição conveniente;
- $d < 0,5a$: são peneiradas com facilidade;
- $D \ll 0,5a$: poeiras e lamas, podem aderir-se a superfície das partículas maiores, sendo encaminhadas ao oversize (partição com a água).



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

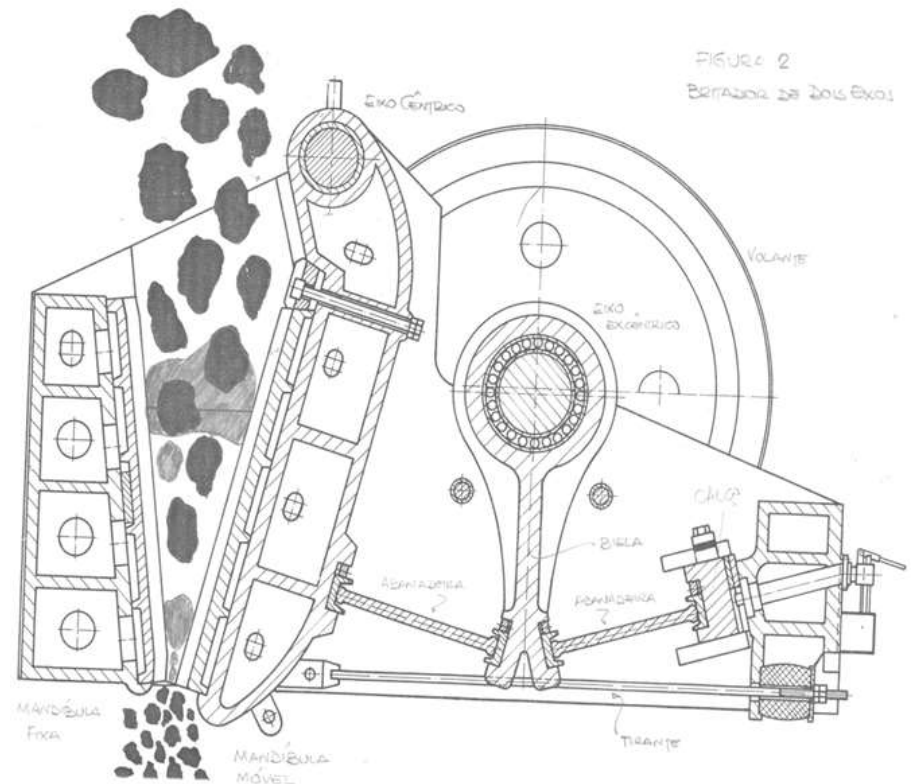
tamanhos maiores, separação de tamanhos por peneiramento, geralmente feita a seco

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

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

Cominuição

- Redução de tamanho:
 - ▣ Britagem: acima de aprox. 20 mm;



Britagem

Pequena relação de redução: forças aplicadas são elevadas e a geometria do equipamento tem importância fundamental;

Principais tipos de britadores:

- ❑ Mandíbulas (1 ou 2 eixos);
- ❑ Giratórios (cônicos);
- ❑ Rolos;
- ❑ Impacto.

Escolha de equipamentos

	Aplicação												
Máquina	Brit. prim., mat. dinam., abrasivo, acima 800 t/h ^{1,5,6}	Brit. prim., mat. dinamitado, abrasivo, abaixo 800 t/h ^{1,5,6}	Britagem prim., mat. dinamitado, não-abrasivo ¹⁷	Britagem secundária, mat. abrasivo ^{2,5,6}	Britagem secundária, mat. não-abrasivo ²⁷	Britagem fina, maximizar os finos, mat. abrasivo ^{3,5,8}	Brit. fina, maximizar os finos, mat. não-abrasivo ^{3,7,8}	Britagem fina - Alimentação úmida e pegajosa ³	Britagem fina - pouca quant. de finos ^{3,8}	Areia de brita, mat. abrasivo ¹⁴	Areia de brita, mat. não-abrasivo ²⁴	Cubicização, mat. abrasivo ¹	Britar ferro-liga, minimizar a quant. de finos ⁸
Britador giratório primário	E	B	B										
Britador de mandíbulas primário	B	E	B										B
Impactor primário	P	P	E										
Rebritador de mandíbulas secundário				B	B								
Impactor secundário				P	E	P	B	B				P	
Rebritador cônico				E	E	B	B	P	E	E	E	B	B
VSI Barmac série B (autógeno)						M	E	E	P	E	E	E	
VSI Barmac série VI						P	E	P	P		B		
Moinho de martelos							E				P		
Britador de rolos									E				E

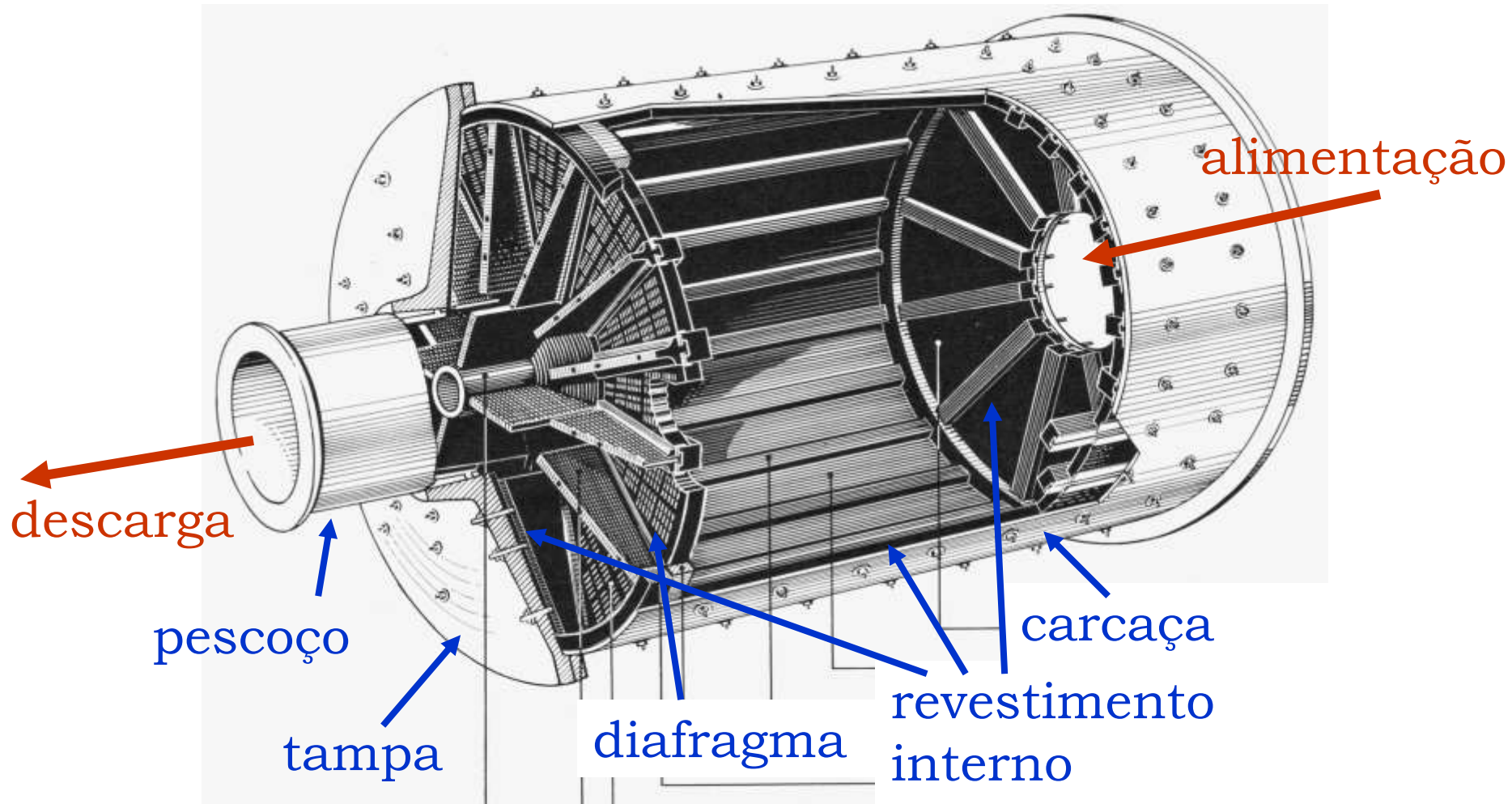
- Excelente (E): melhor escolha para a aplicação
- Boa (B): É aplicável, porém, não é a melhor opção;
- Possível (P): É aplicável com restrições. O seu uso deve ser precedido de detalhado estudo técnico;
- Inviável (): Salvo raras exceções, seu uso é inviável ou totalmente anti-econômico

Moagem

- Em geral abaixo de $\frac{3}{4}$ ";
- Pode ser realizada a seco e a úmido;
- Circuito aberto ou fechado;
- Ampla faixa de alimentação e produto, conforme o equipamento;
- Redução de tamanho principalmente por impacto, abrasão e atrição.

Moagem - equipamentos

□ Moinhos tubulares



Moagem - equipamentos

□ SAG/AG



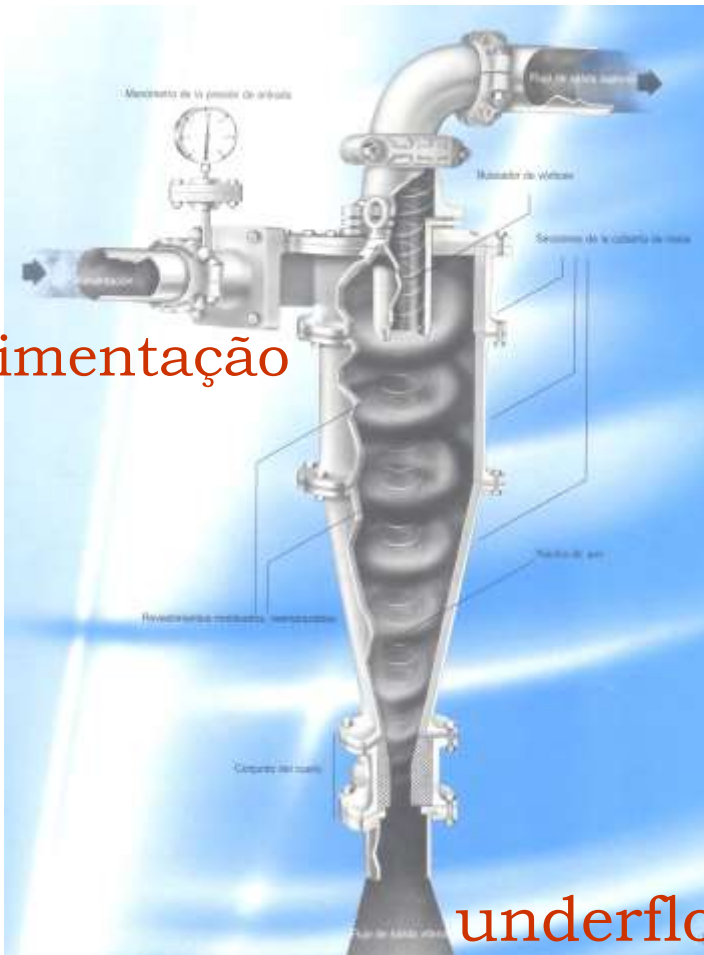
Moagem - equipamentos

□ SAG/AG



Moagem

- fechamento: < 48# - ciclone (eficiência = 60 a 70%)



overflow



vortex
finder

inlet

apex

underflow

Moagem

- fechamento: classificador espiral (eficiência aprox. 85 a 90%)



Moagem – 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:

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

$k_3/10$ = “work index” = WI

P [kW]; Q [t/h], P e F [µm]

Moagem – estimativa de consumo energético

moinho para ensaio de WI



Moagem – 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)

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			

Exercícios

7) Qual a potência necessária para que um moinho de bolas realize o trabalho abaixo, utilizando a equação de Bond. Este consumo equivale ao de quantas residências, considerando-se que o moinho opera 90% das horas disponíveis em um mês?

Vazão de alimentação: 1.600 t/h

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

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

WI de laboratório = 17 kWh/t

FONTES:

- 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.
- 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>
- Burchardt, E. Dry finish grinding with HPGRs: The next step ahead in mineral comminution? In: **XXVII International Mineral Processing Congress**, 2014, Santiago. Chile: Gecamin, 2014.
- Dufour, L.; McVey, K.; Perkins, S.; Rolandi, L.; Young, E. SAG and ball mill circuit layout and design. In: **SAG Confewrence 2011**, 2011, Vancouver. Canada: UBC, 2011.
- Fuerstenau, M.C.; Han, K.N. **Principles of mineral processing**. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration of SME, 2003. 573 p.
- Reple, A.; Duffy, K.; Valery, W.; Jankovic, A.; Holtham, P. Integrating Bulk Ore Sorting into a Mining Operation to Maximise Profitability. 2015. Disponível em: http://www.abmbrasil.com.br/cim/download/2015_10_5_15_50_8_87597.pdf
- Imagens e vídeos google images
- Imagens do autor