Curso de especialização em tratamento de minérios

Cominuição

Moinhos de bolas e barras

Poços de Caldas – 09 de Novembro de 2012

Professor Mauricio Guimarães Bergerman

UNIFAL – MG - Instituto de Ciência e Tecnologia – Núcleo de Engenharia de Minas

Avisos

- O próximo módulo será dia 30/nov. O Prof. André irá enviar mais informações por e-mail;
- A avaliação desta unidade será baseada na entrega de 20 exercícios da lista entregue na primeira aula (todos os exercícios vistos em aula e os demais por livre escolha do aluno);
- Quem não atingir a frequência, deverá fazer um exercício extra.

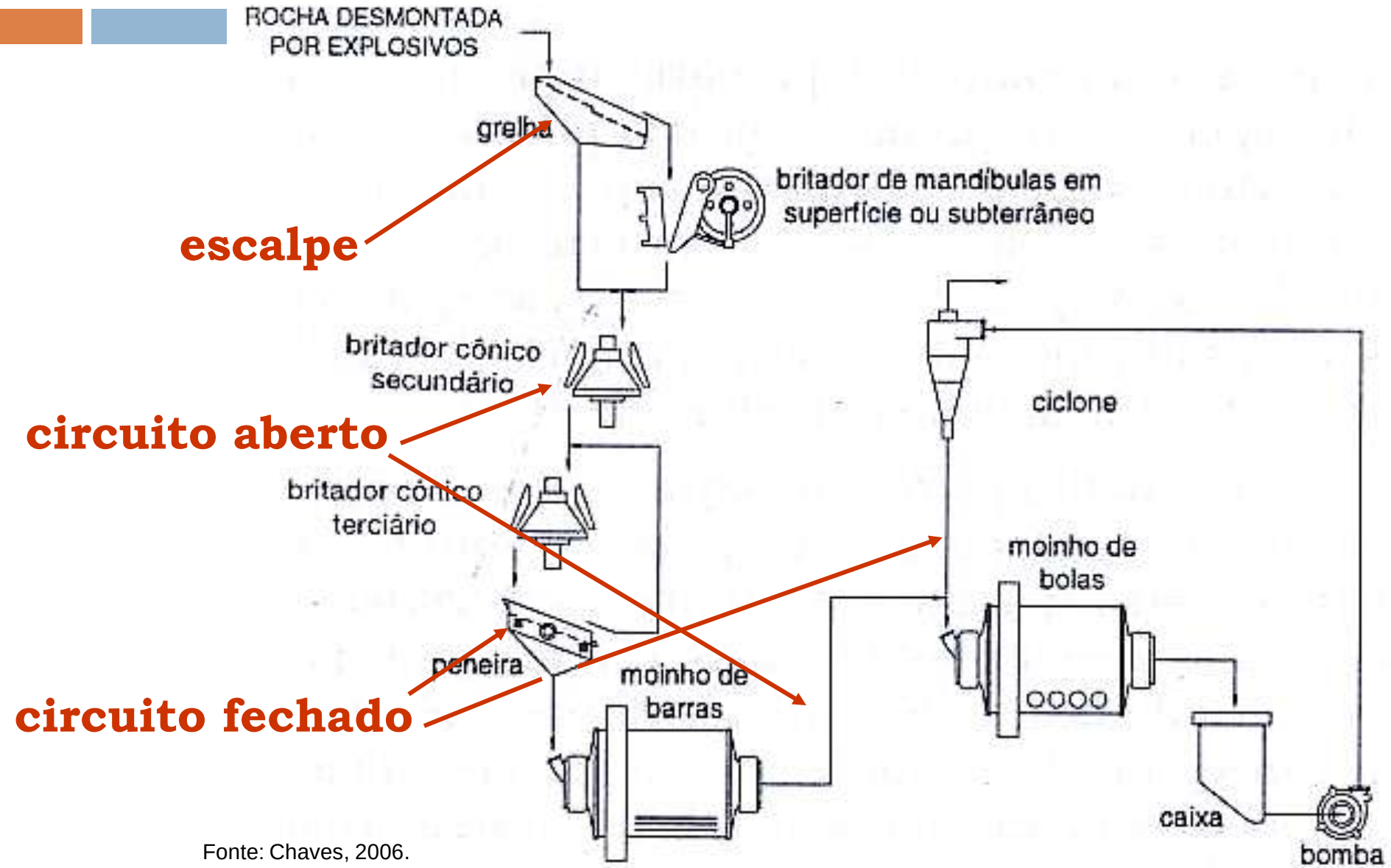
Cominuição – seleção de equipamentos

TABLE 8.2 APPLICATIONS OF GRINDING MILLS

APPLICATIONS	AUTOGENOUS			ROD		BALL		MULTI-COM--PARTMENT	SPECIAL (Pebble)	VBM	RING-ROLLER MILL
	Prim.	Int.	Sec.	Overflow	Peripheral Discharge	Overflow	Diaphragm				
Ores (Ferrous and Non-ferrous)	■	■	■	■	■	■	■			■	■
Preparation of fine aggregate				■	■	■	■				
Talc and ceramic materials									■	■	
Cement raw materials	■	■		■			■	■			■
Cement clinker					■		■	■			
Coal, oil shale and petroleum coke					■		■	■			■
Silica, ceramics, etc. (must be free of iron)									■	■	
Production of a specific mesh size	■	■	■	■	■	■	■		■	■	■
Production of a specific surface area							■	■	■		■
Wet grinding	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Dry grinding	■	■	■		■		■	■	■	■	■
Damp feed (1% to 15% moisture)					■					■	■
Large feed (minus 10")	■										
Large feed (minus 4")											■
Large feed (minus 1")		■		■	■			■			
Intermediate size feed (minus ½")		■		■	■	■	■	■		■	
Fine feed (minus 14 mesh)			■			■	■	■	■	■	
Coarse product (minus 6 mesh)	■		■	■							
Fine product (minus 35 mesh)	■	■	■			■	■	■	■	■	■
Maximum production of fines						■	■	■	■	■	
Minimum production of fines	■	■	■		■						
Production of cubical particles				■	■	■	■			■	
Primary mill of two-stage circuit	■	■		■	■		■				
Secondary mill of two-stage circuit			■			■	■				
Operation in open or closed circuit				■	■			■	■	■	
Operation in closed circuit only	■	■	■			■	■	■			■

Fonte: Kelly e Spottswood, 1982

Circuito clássico de cominuição



Fonte: Chaves, 2006.

Moagem

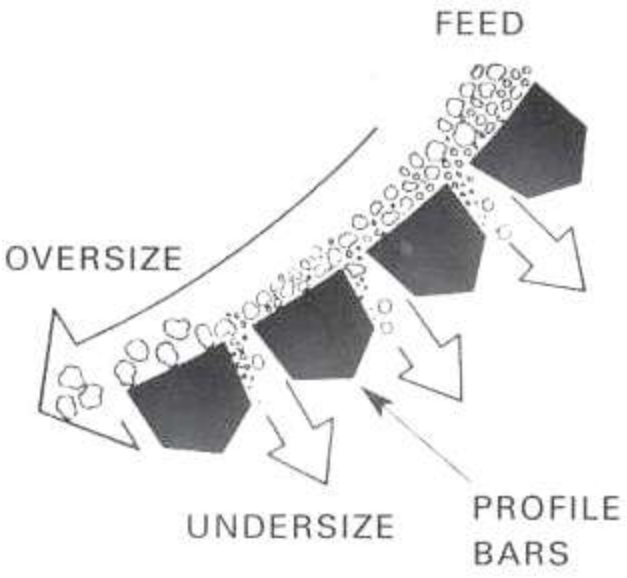
- Em geral abaixo de ¾";
- Pode ser realizada a seco e a úmido;
- Circuito aberto ou fechado;
- Ampla faixa de alimentação e produto, conforme o equipamento;
- Redução de tamanho principalmente por impacto, abrasão e atrição;
- Alto custo: até 40% dos custo total!
- Alguns autores distinguem moagem autógena de moagem.

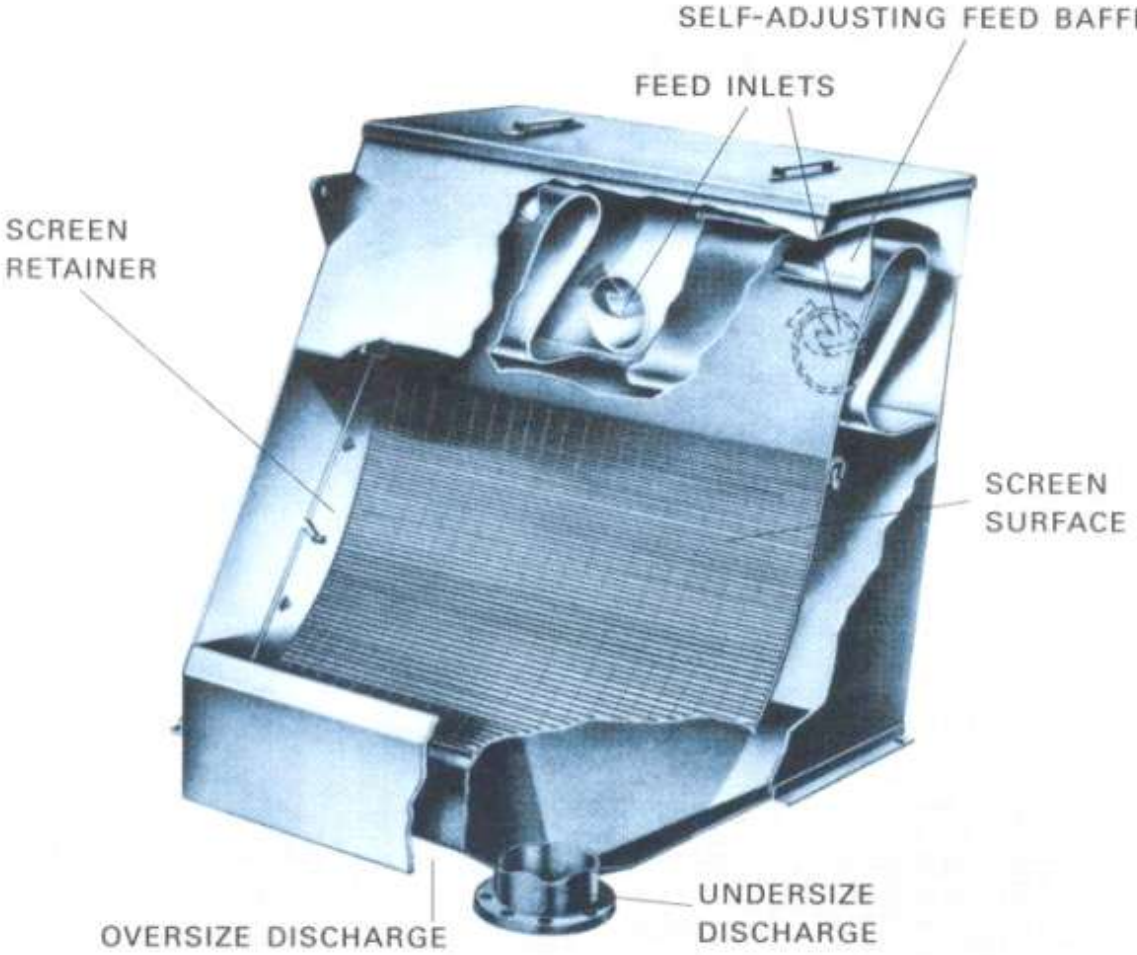
Moagem

- circuitos fechados:
  - > 20# (até 65#) – peneira vibratória;
  - 20 a 65# - peneira DSM;
  - < 48# - ciclone (eficiência aprox. 60 a 70%) ou classificador espiral (eficiência aprox. 85 a 90%)

Moagem

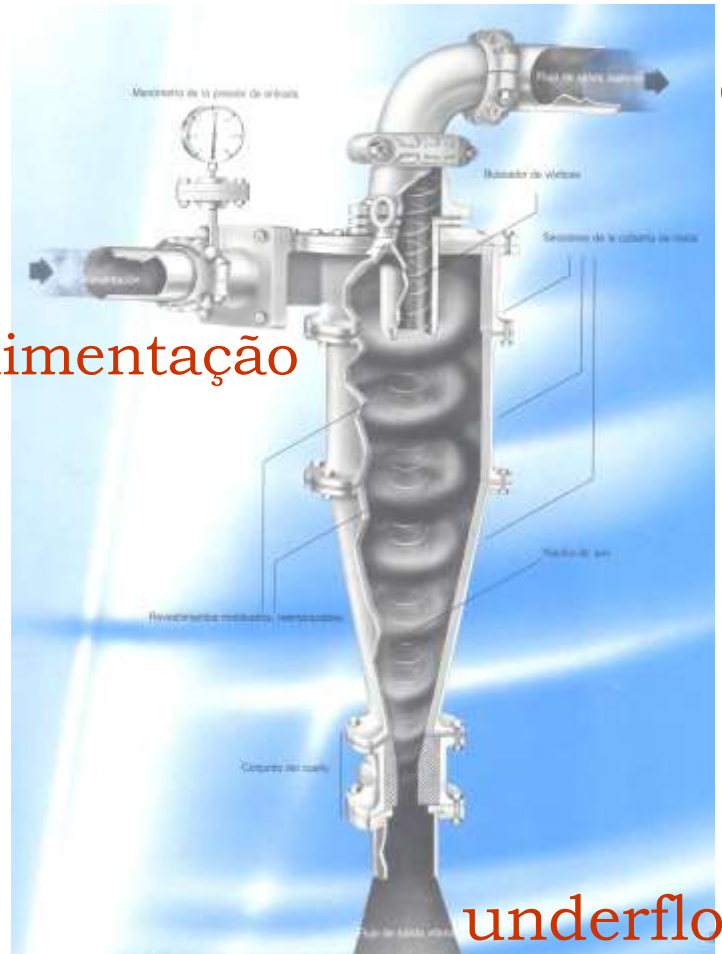
- fechamento: 20 a 65# - peneira DSM





Moagem

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

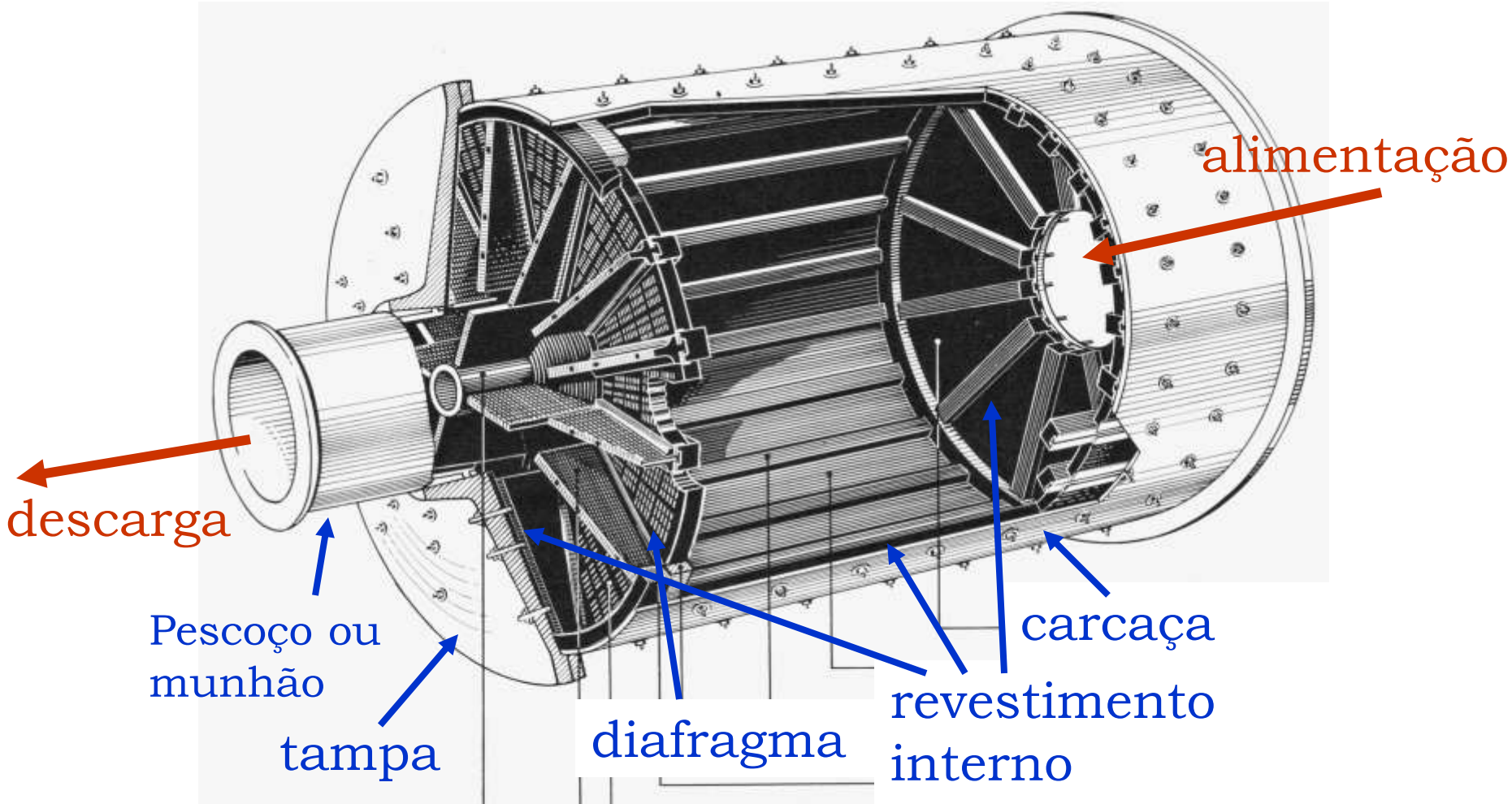


Moagem

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

Moagem - equipamentos

- Moinhos tubulares ou de carga cadente: bolas, barras ou seixos.



acionamento

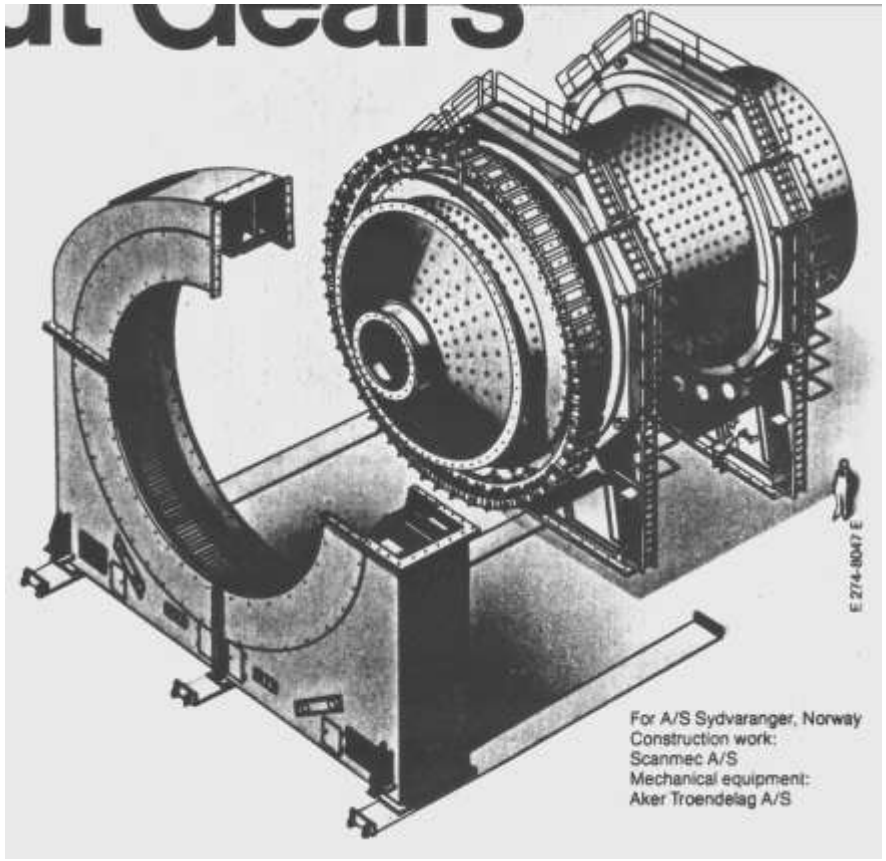
coroa

pinhão

Longe da alimentação!

Diversos acionamento:

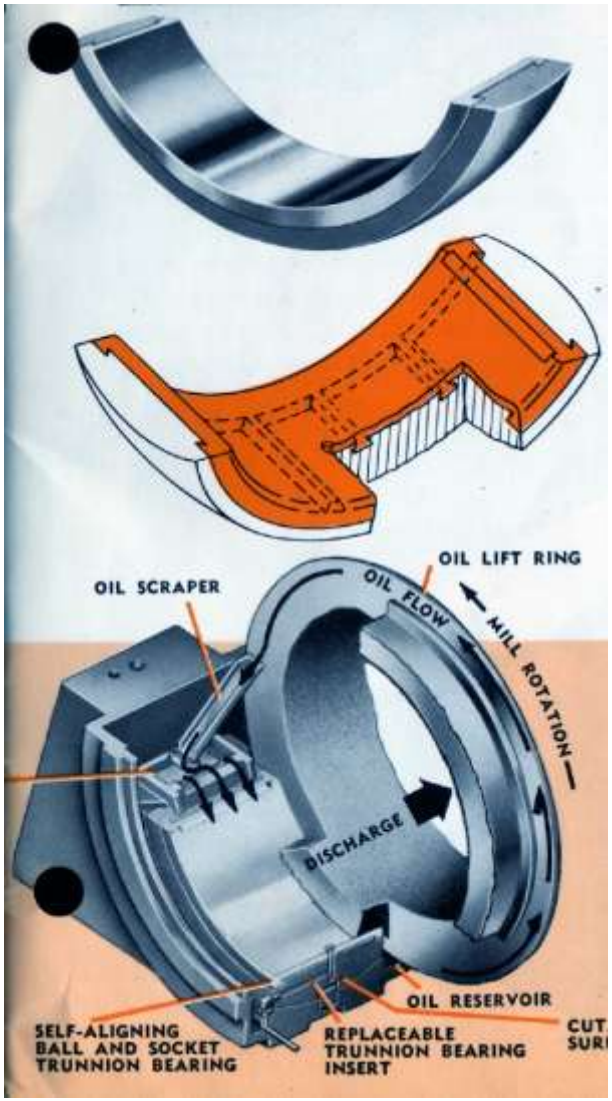
- Correias;
- Redutor;
- Embreagem;
- Motores auxiliares.

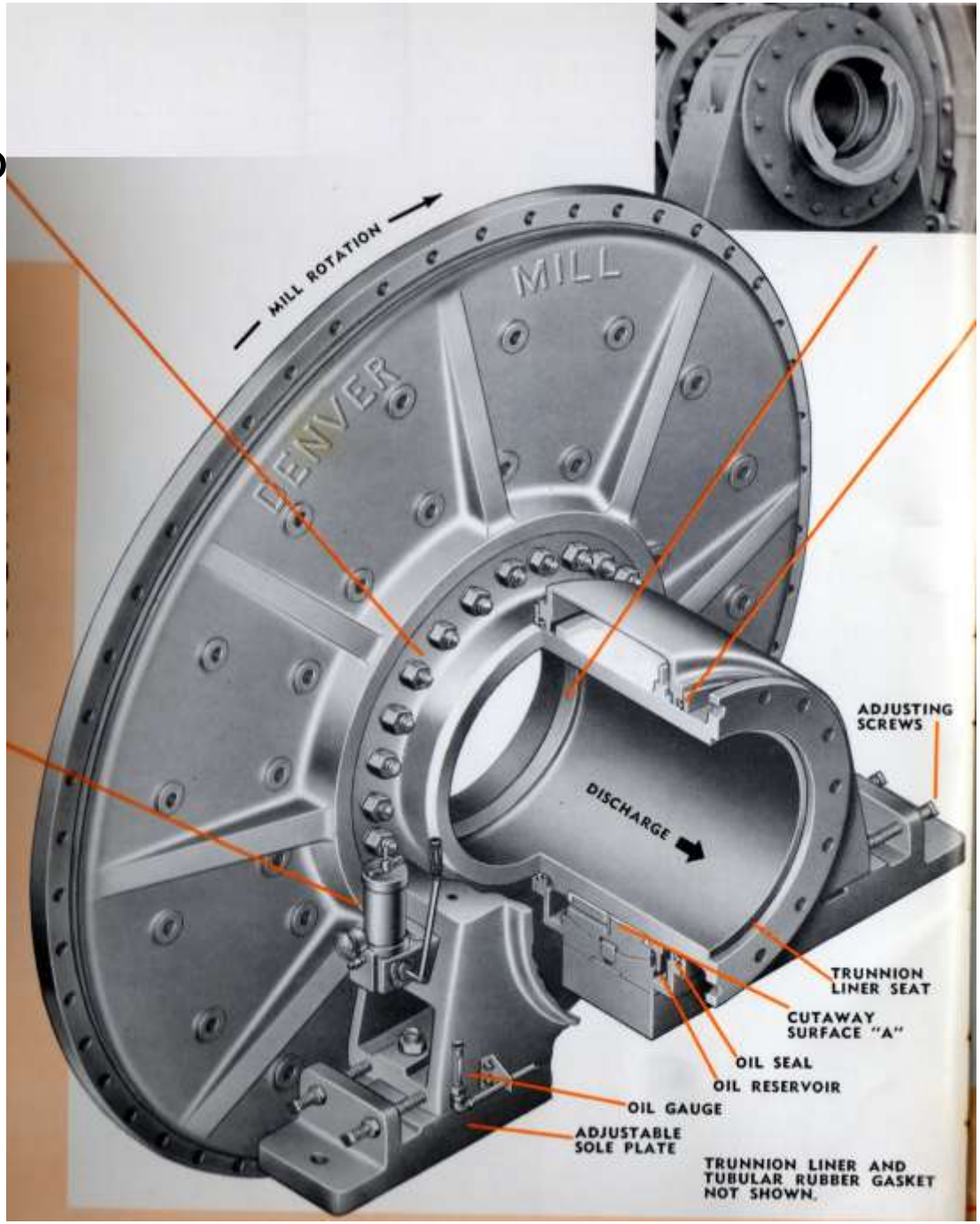


para grandes moinhos a coroa foi substituída pelo induzido do motor

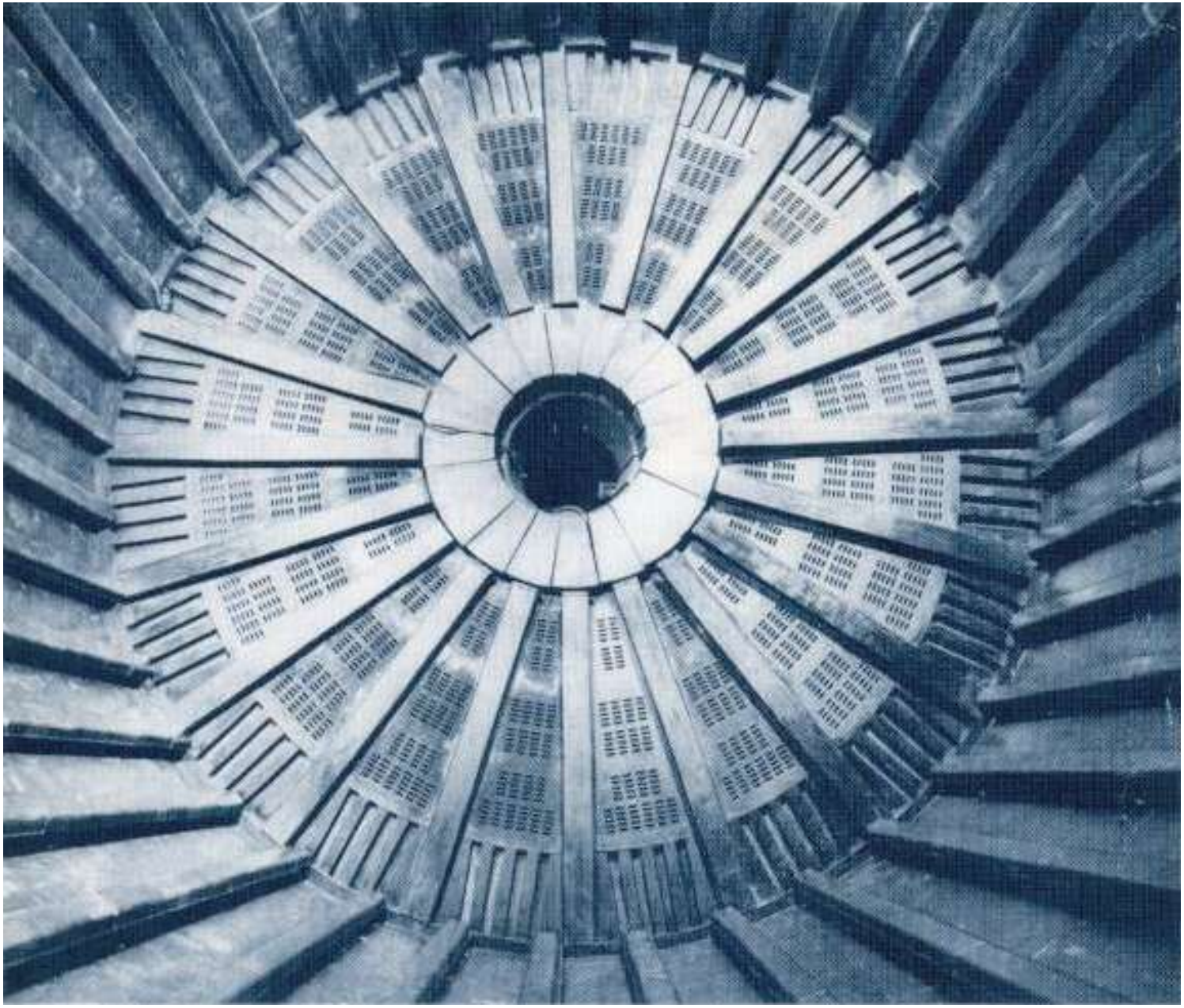
Mancais

tampa e pescoço



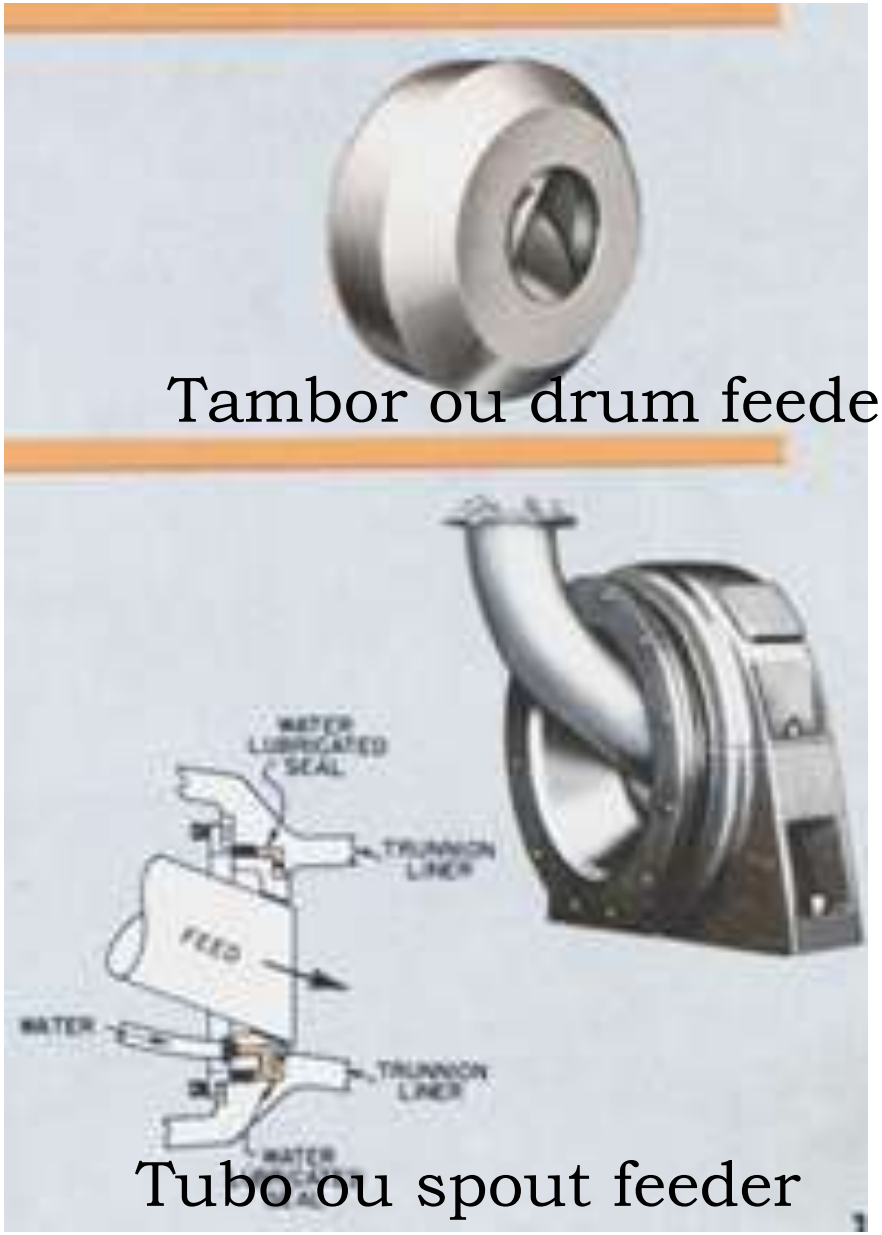


diafragma



Alimentadores

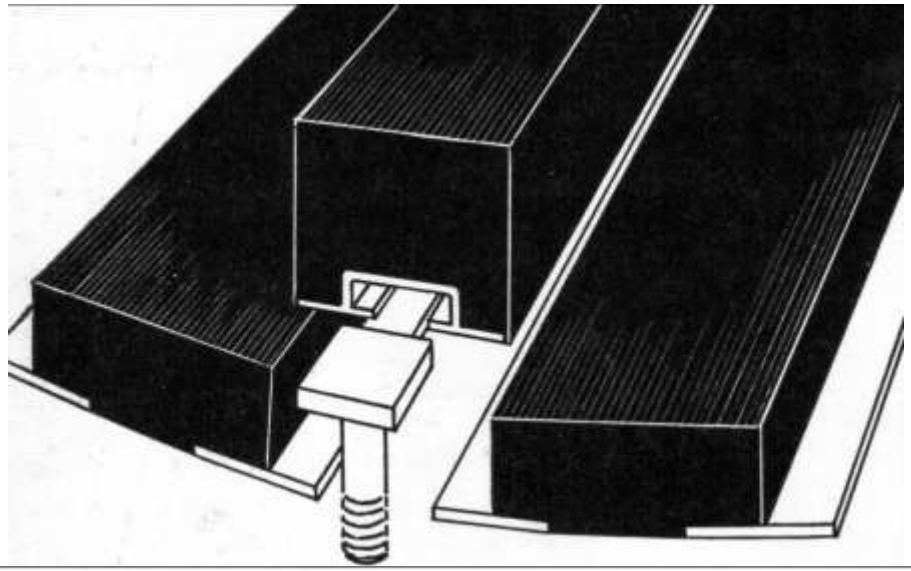
Bico de papagaio
ou scoop feeder

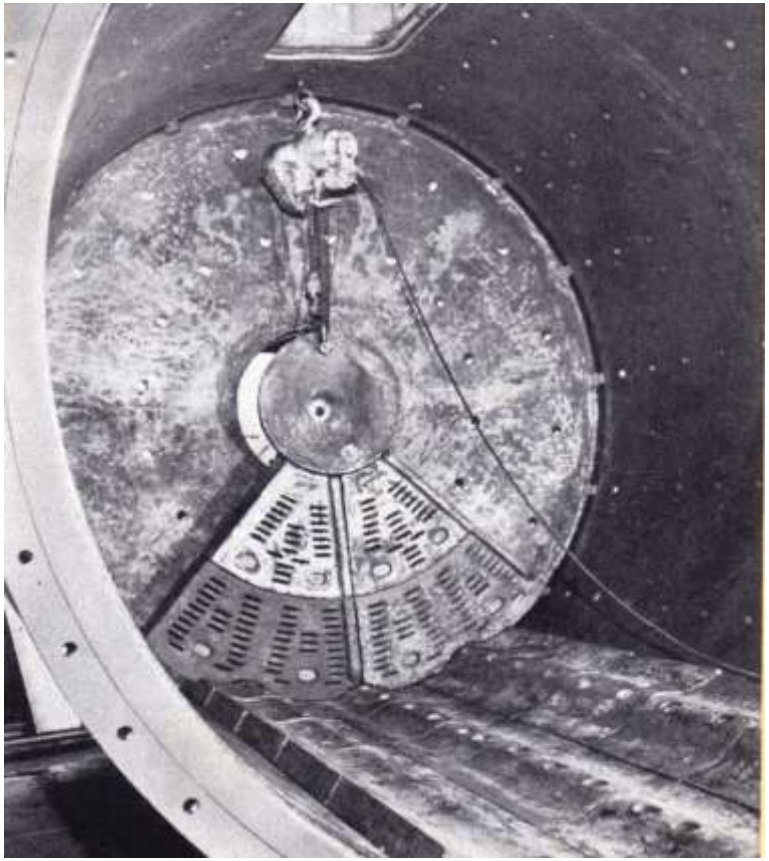


Tambor ou drum feeder

Tubo ou spout feeder

Revestimentos: aço, ferro fundido, borracha, mistos, cerâmica...

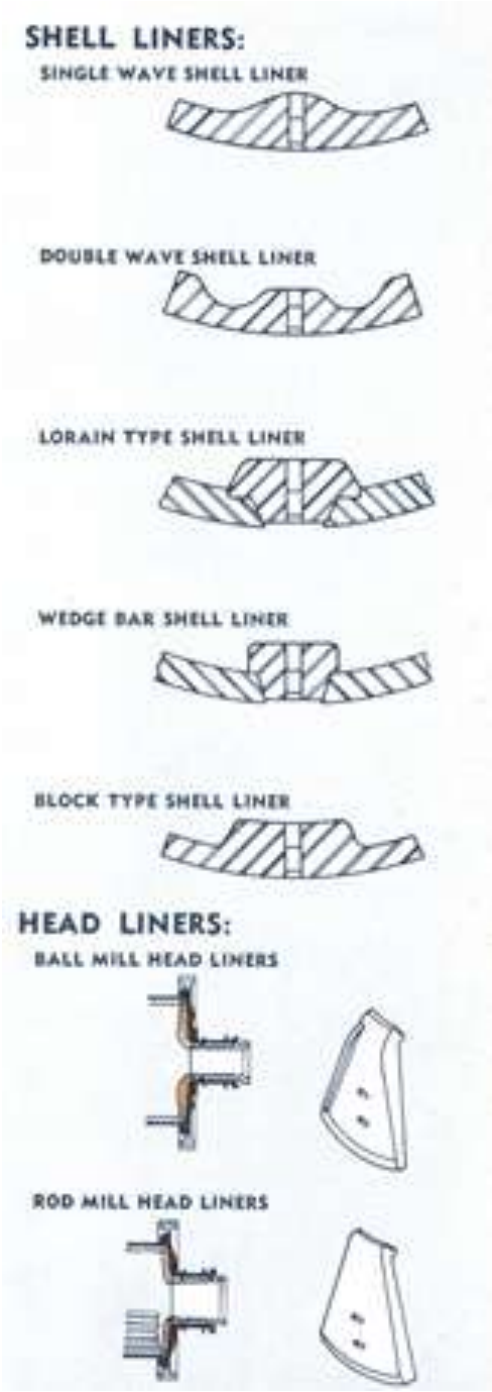


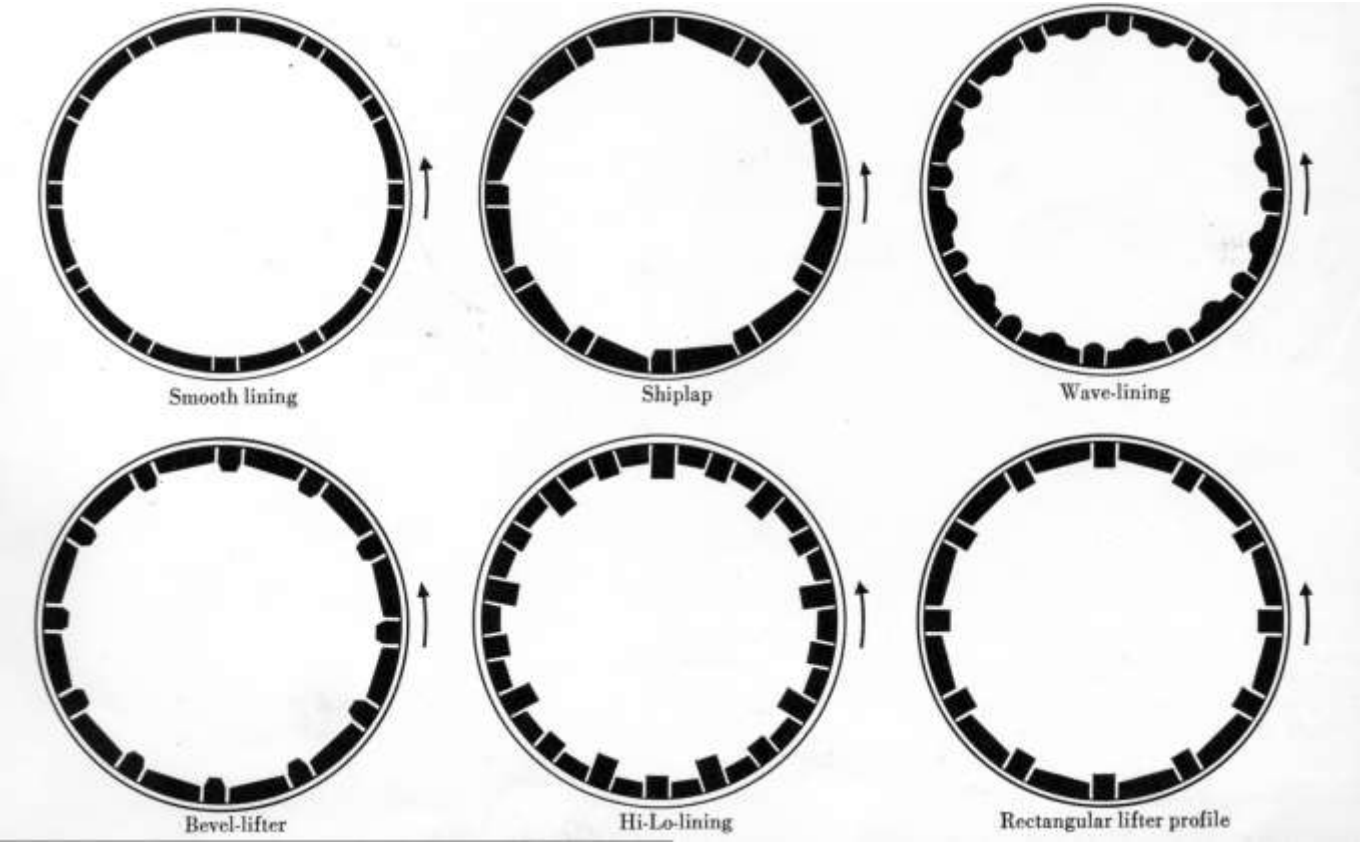


fixação de revestimentos de borracha e metálicos

Fonte: Chaves, 2006.

revestimentos metálicos

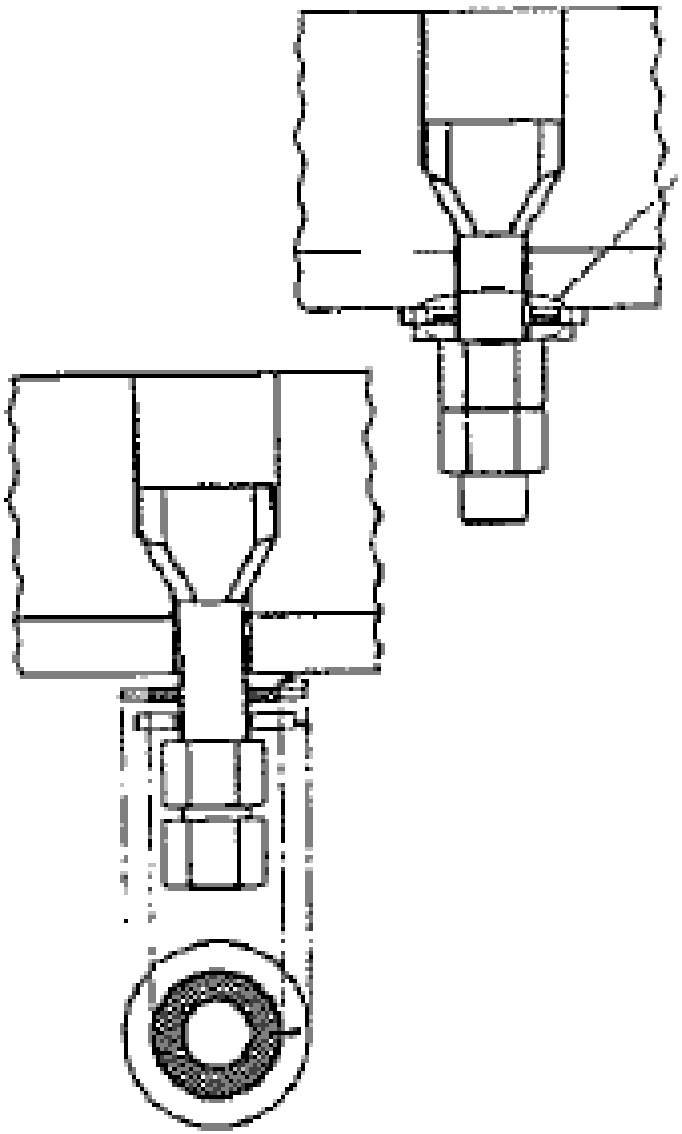




revestimentos de borracha

Fonte: Chaves, 2006.

Fixação dos revestimentos



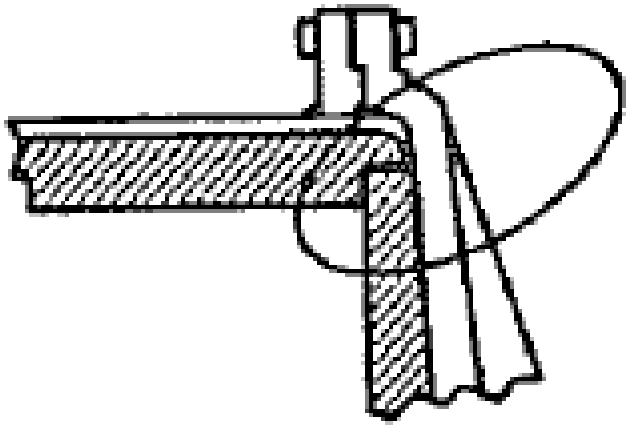
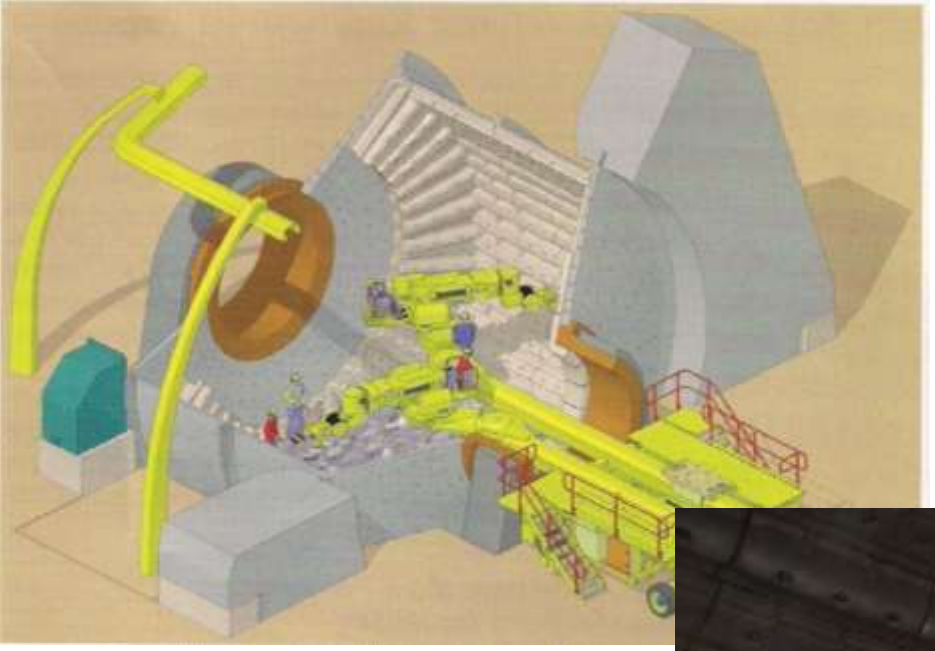


Figura 6 - *detalhe*

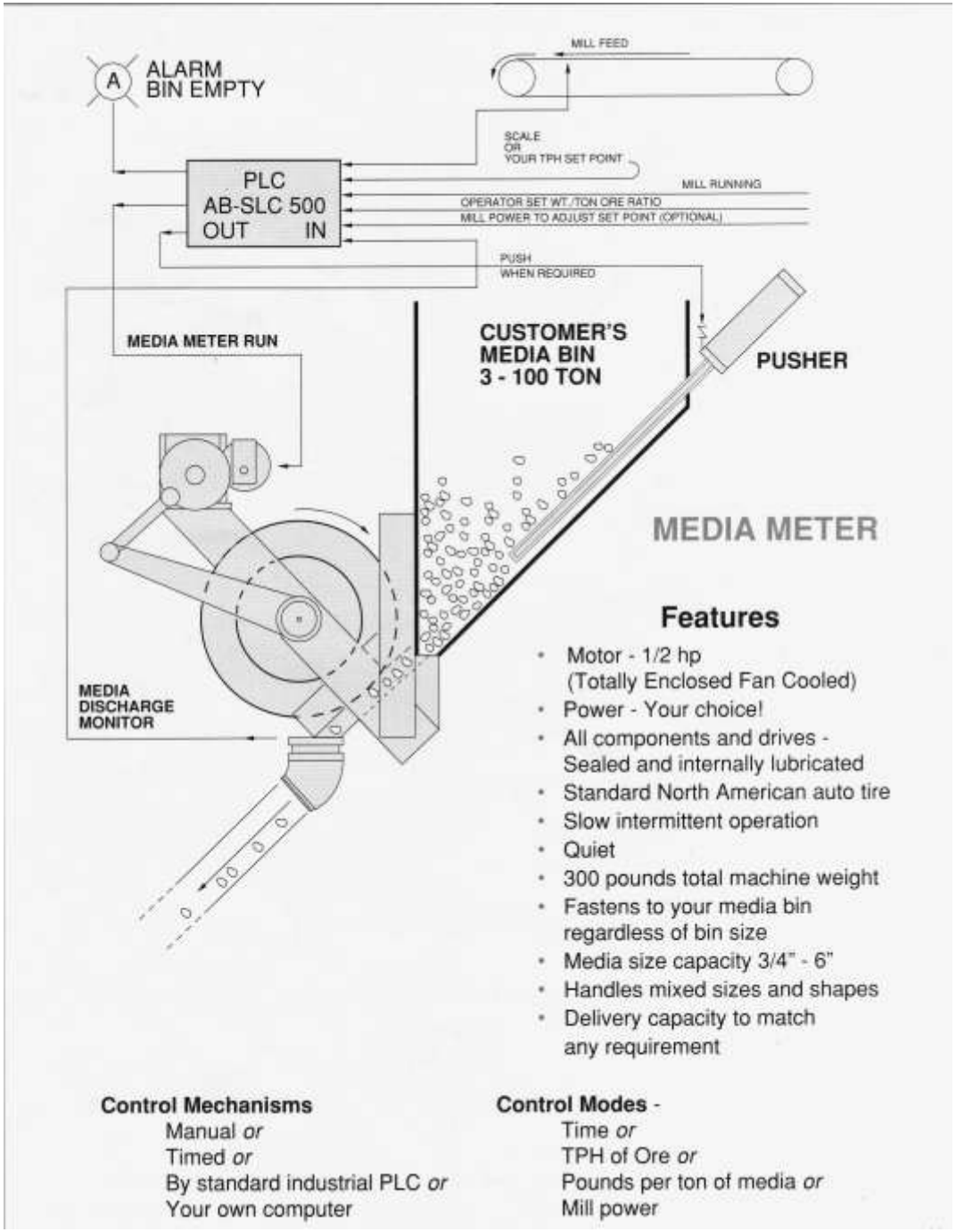
Fonte: Chaves, 2006.



troca de revestimentos metálicos

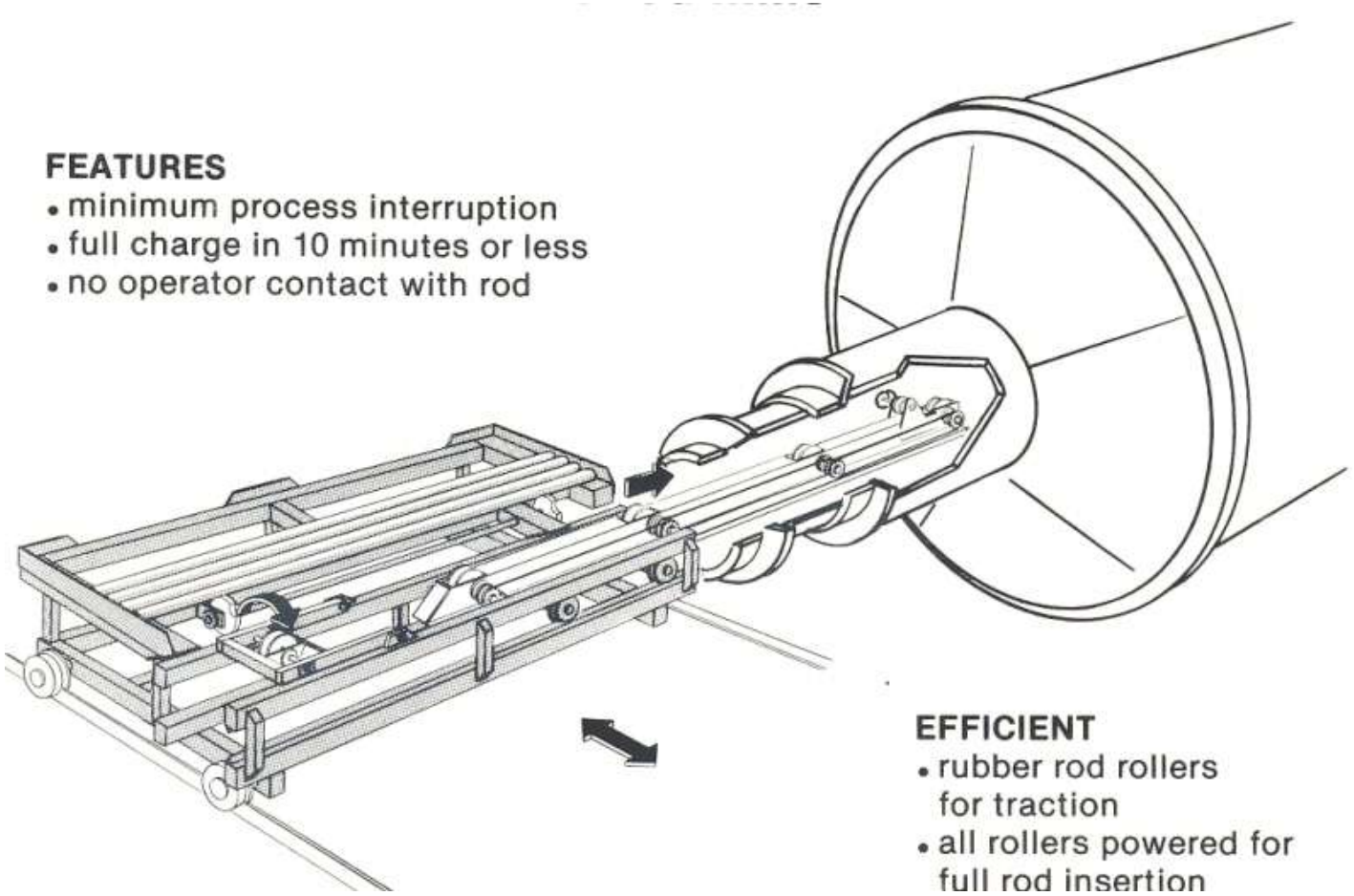
moagem

reposição automática de corpos moedores



moagem

carregamento de barras

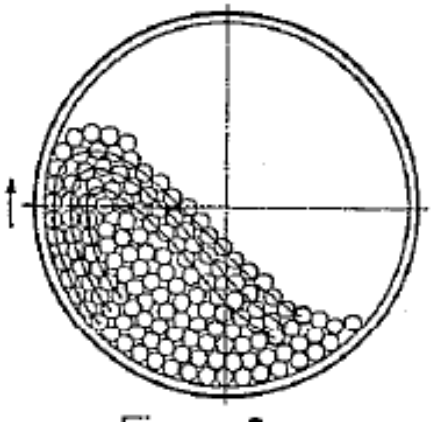


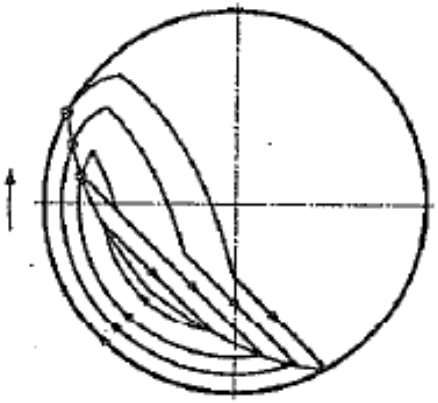
Moagem – dinâmica interna

- Características principais:
  - Dimensões (diâmetro e comprimento) e potência instalada;
  - Variáveis operacionais: quantidade de corpos moedores, velocidade de rotação e porcentagem de sólidos;
    - Custo corpos moedores:
      - Chaves, 2009: de USD 250 a 1250/t
      - Vale, 2010: USD 2.500

Moagem – dinâmica interna

- Variação da rotação:
  - Baixa velocidade: cascata (ou rolamento)





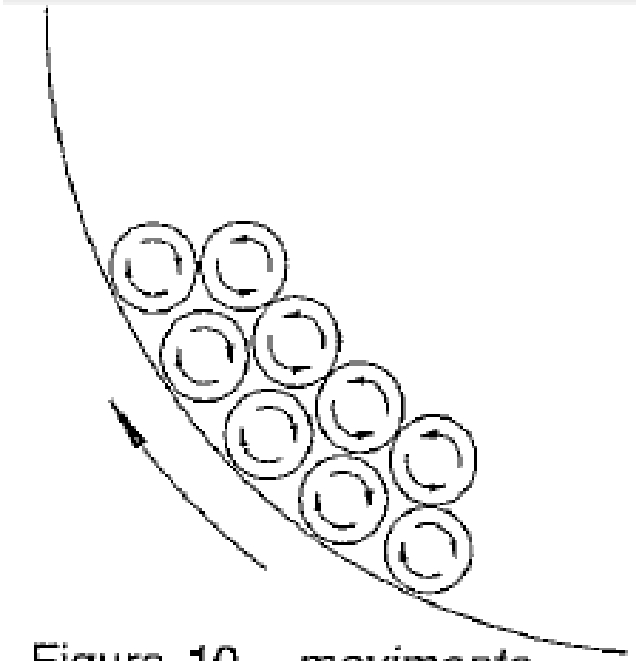
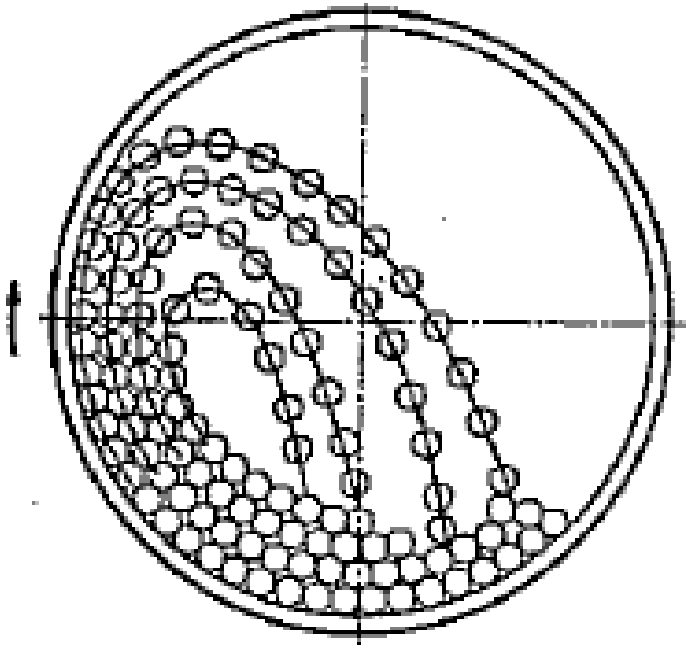


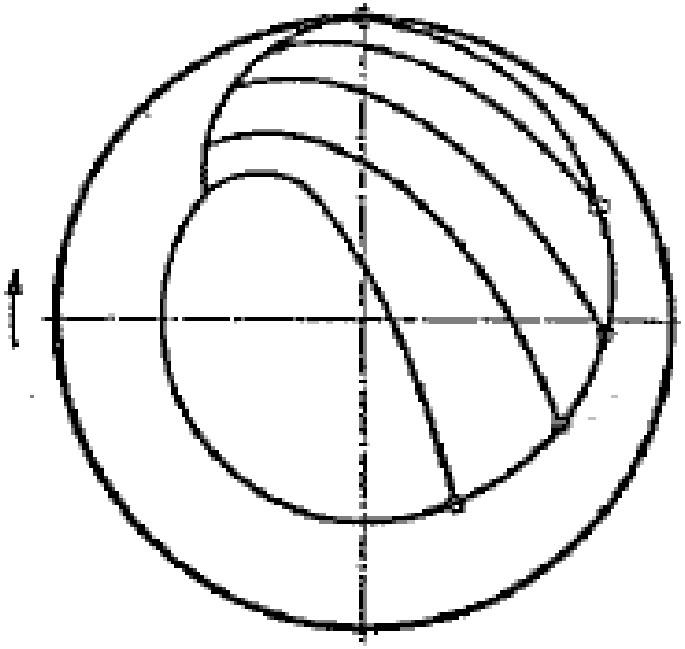
Figura 10 - *movimento individual dos corpos moedores*

Fonte: Chaves, 2006.

Moagem – dinâmica interna

- Variação da rotação:
  - Aumento da velocidade: catarata (ou cascateamento)

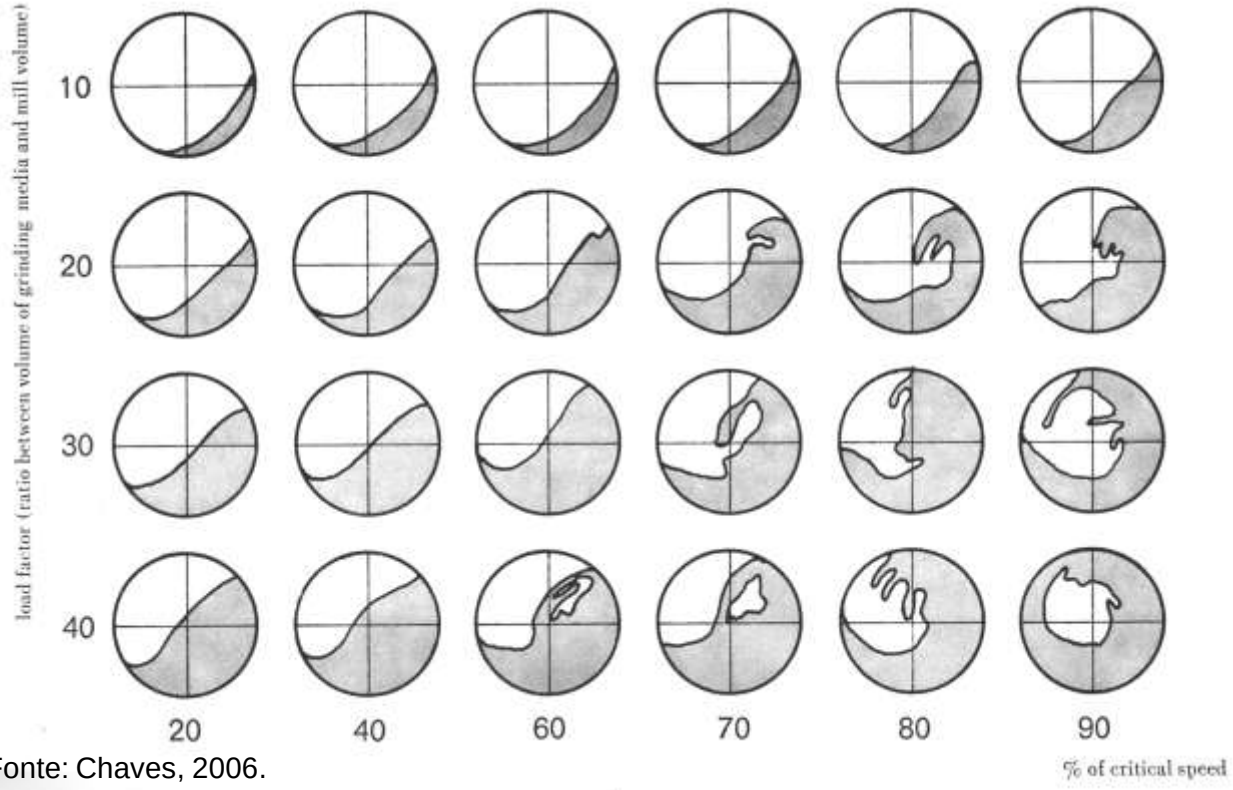




Fonte: Chaves, 2006.

Moagem – dinâmica interna

- Variação da rotação:
  - Aumento excessivo da velocidade: centrifugação



Fonte: Chaves, 2006.

Moagem – dinâmica interna

- Velocidade crítica

Vídeo

Cascata e catarata

Centrifugação

Moagem – dinâmica interna

- Velocidade crítica

$$Nc = \frac{42{,}3}{\sqrt{(D-d)}}$$

- (rev/min)

$$V_c = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{\frac{2g}{D}}$$

- (rev/s)

- D e d em metros

Moagem – dinâmica interna

- Exercícios:

18) O que ocorre em um moinho quando ele é operado acima de sua velocidade crítica? Para um moinho com diâmetro interno ao revestimento de 4,37 m e corpos moedores com tamanho máximo de 50 mm, determinar qual seria a velocidade crítica.

Moagem – dinâmica interna

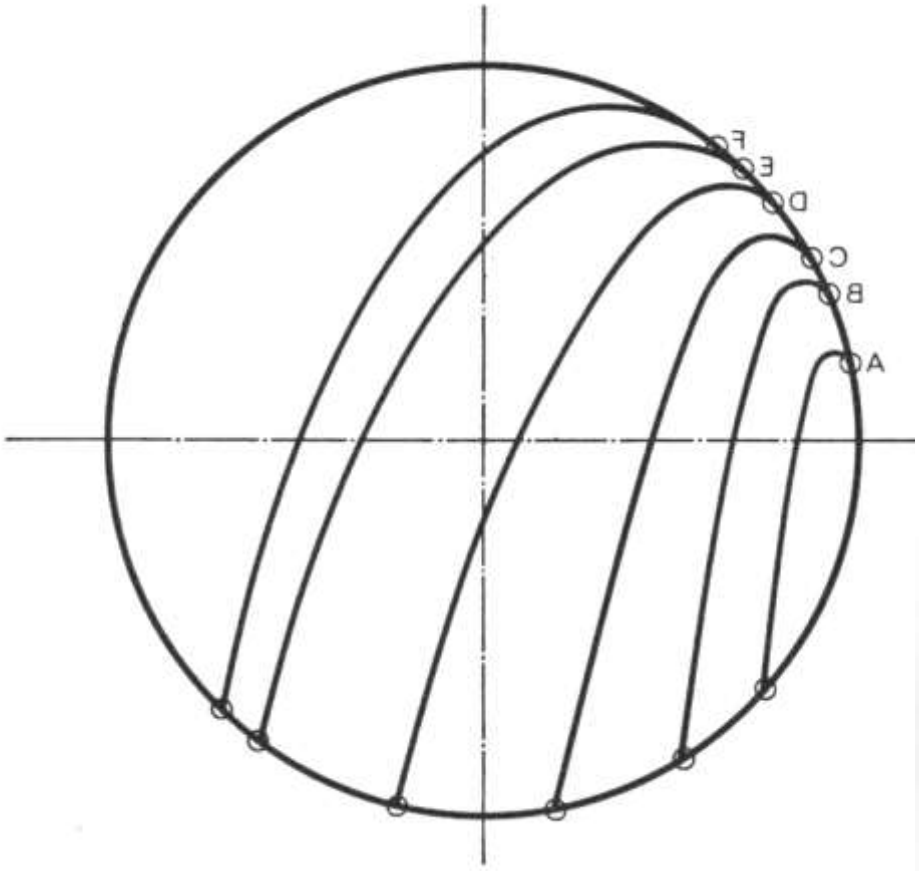
- Velocidade crítica

diâmetro interno (ft)	3 a 6	6 a 9	9 a 12	12 a 15	15 a 18
% VC - BARRAS	76 a 73	73 a 70	70 a 67	67 a 64	-
% VC - BOLAS	80 a 78	78 a 75	75 a 72	72 a 69	69 a 66

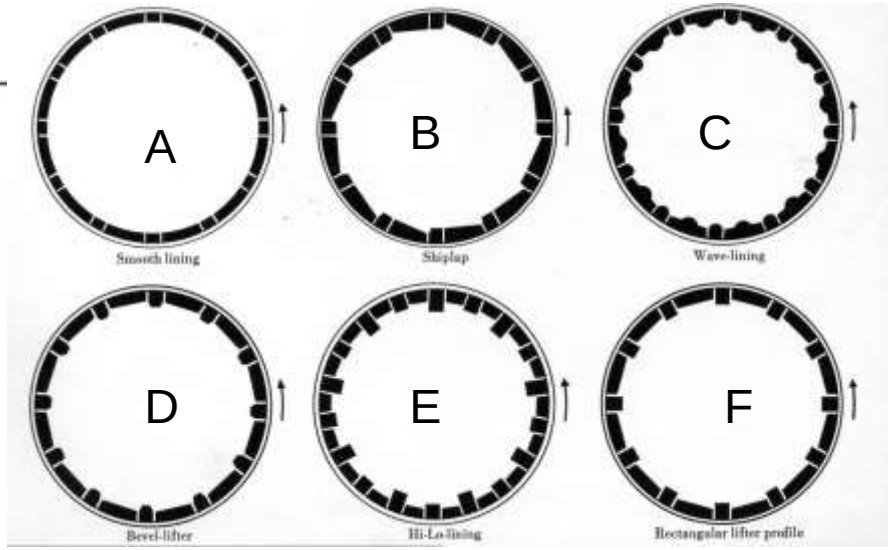
Fonte: Chaves, 2006.

Moagem – dinâmica interna

- Influência do revestimento no levantamento da carga

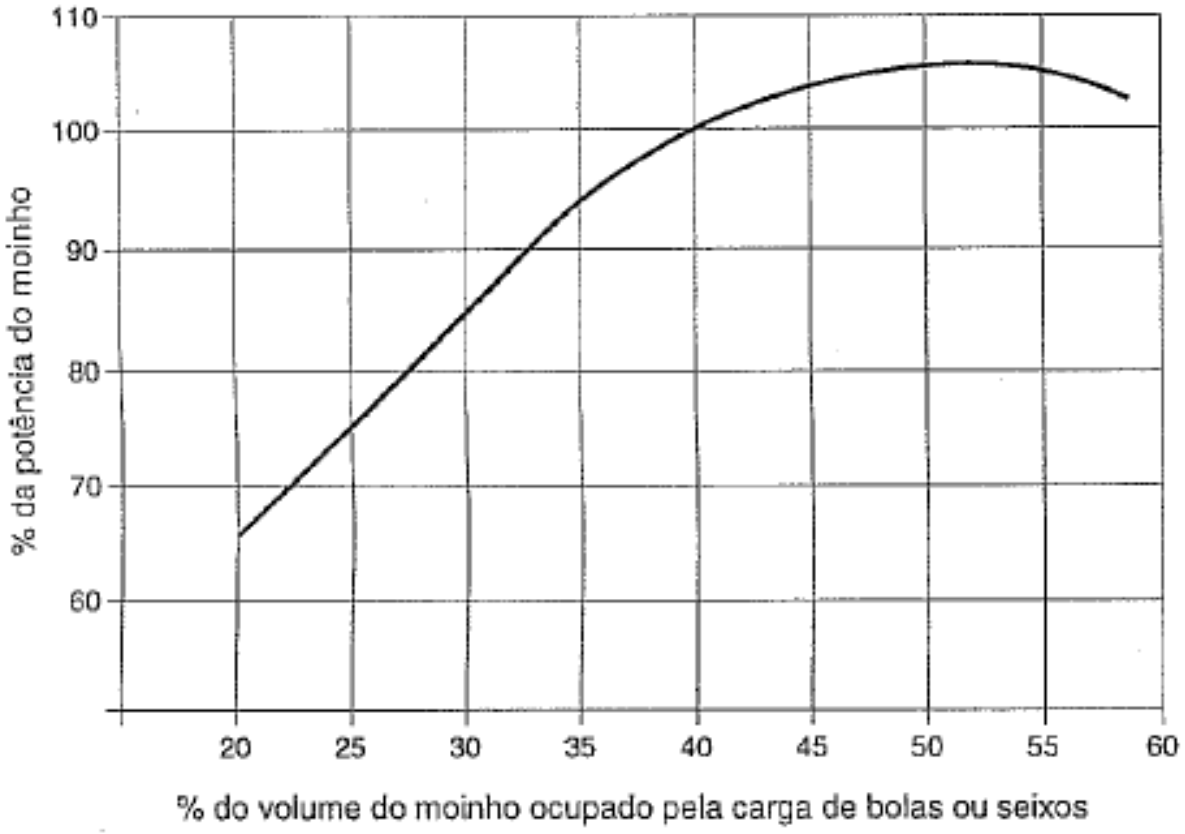


Fonte: Chaves, 2006.



Moagem – dinâmica interna

- Potência



Fonte: Chaves, 2006.

Moagem – dinâmica interna

- Potência

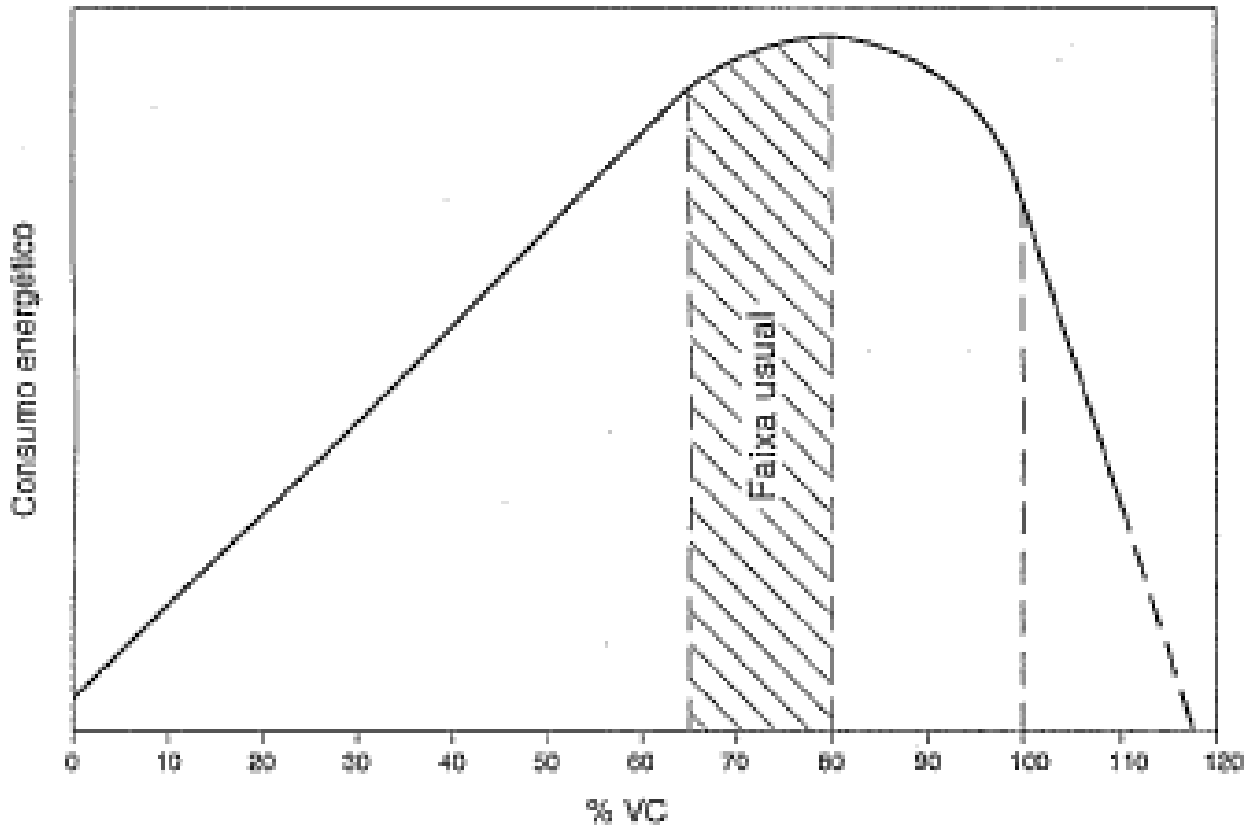
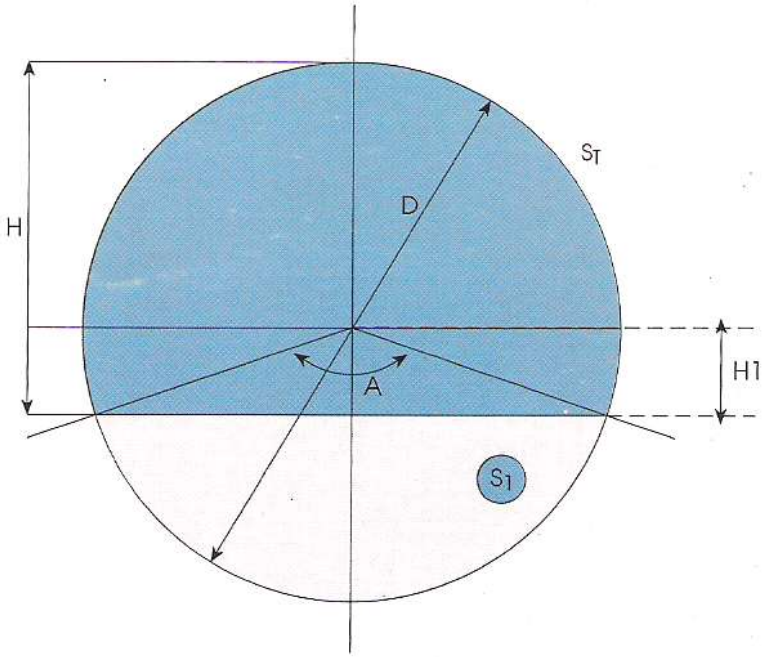


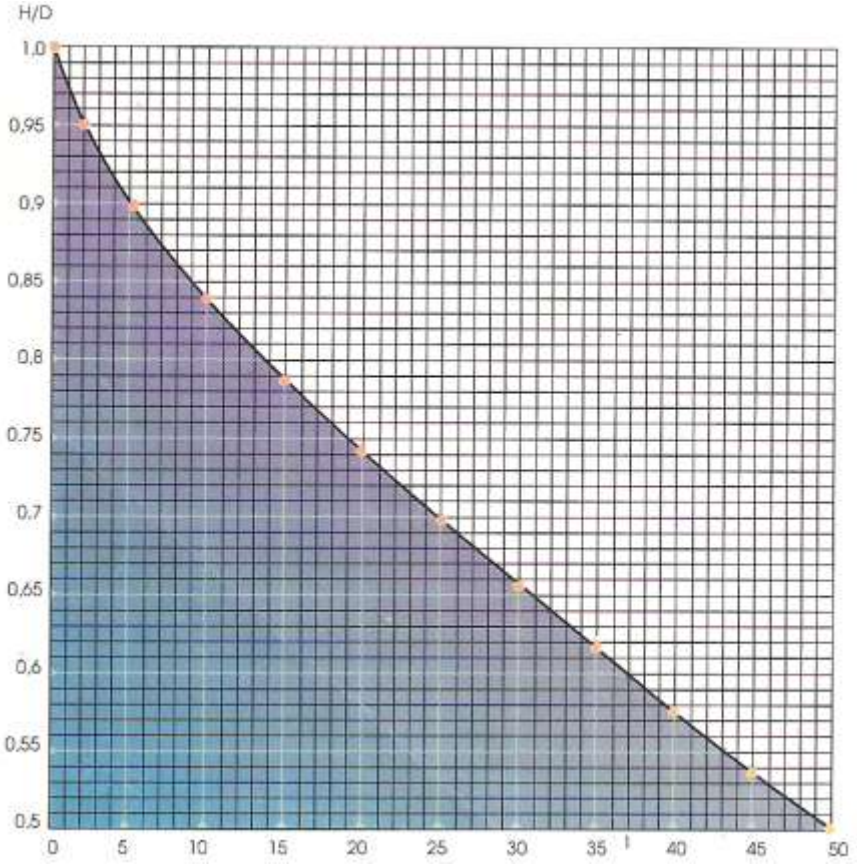
Figura 19 - *consumo energético x velocidade*
Fonte: Chaves, 2006.

Moagem – dinâmica interna

- Grau de enchimento
  - Vc = 113-126*Hc/D
    - Vc = volume da carga (%)
    - Distância entre o topo do moinho e da carga moedora (m)
    - Diâmetro interno do moinho (m)

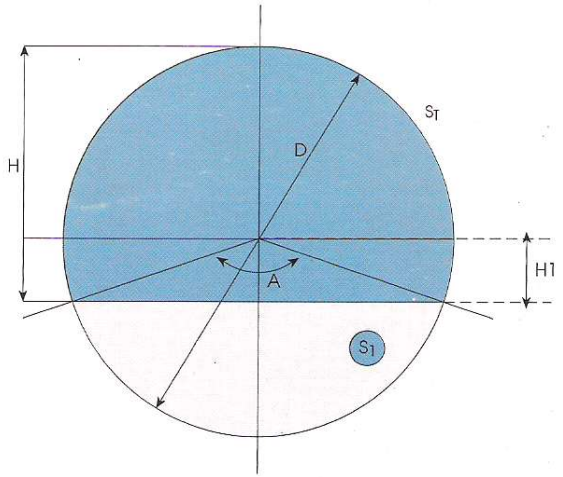
Moagem – dinâmica interna





Fonte: Torquato, 2007.

Moagem – dinâmica interna



$S_T = \pi \frac{D^2}{4}$	.....m²
$H_1 = H - \frac{D}{2}$	.....m
$A = 2 \times ARCOS\left(\frac{2 \times H_1}{D}\right)$	.....°
$S_1 = \frac{D^2}{8} \times \left(\frac{\pi \times A}{180°} - SinA\right)$	.....m²
$R = \frac{S_1}{S_T} \times 100$	.....%

Fonte: Torquato, 2007

- ✓ H = altura livre da carga moedora (em relação ao diâmetro interno do moinho);
- ✓ D = diâmetro interno do moinho;
- ✓ St = área total interna ao revestimento;
- ✓ S1 = área da carga moedora;
- ✓ R = grau de enchimento (%)

Moagem – via seca ou úmida

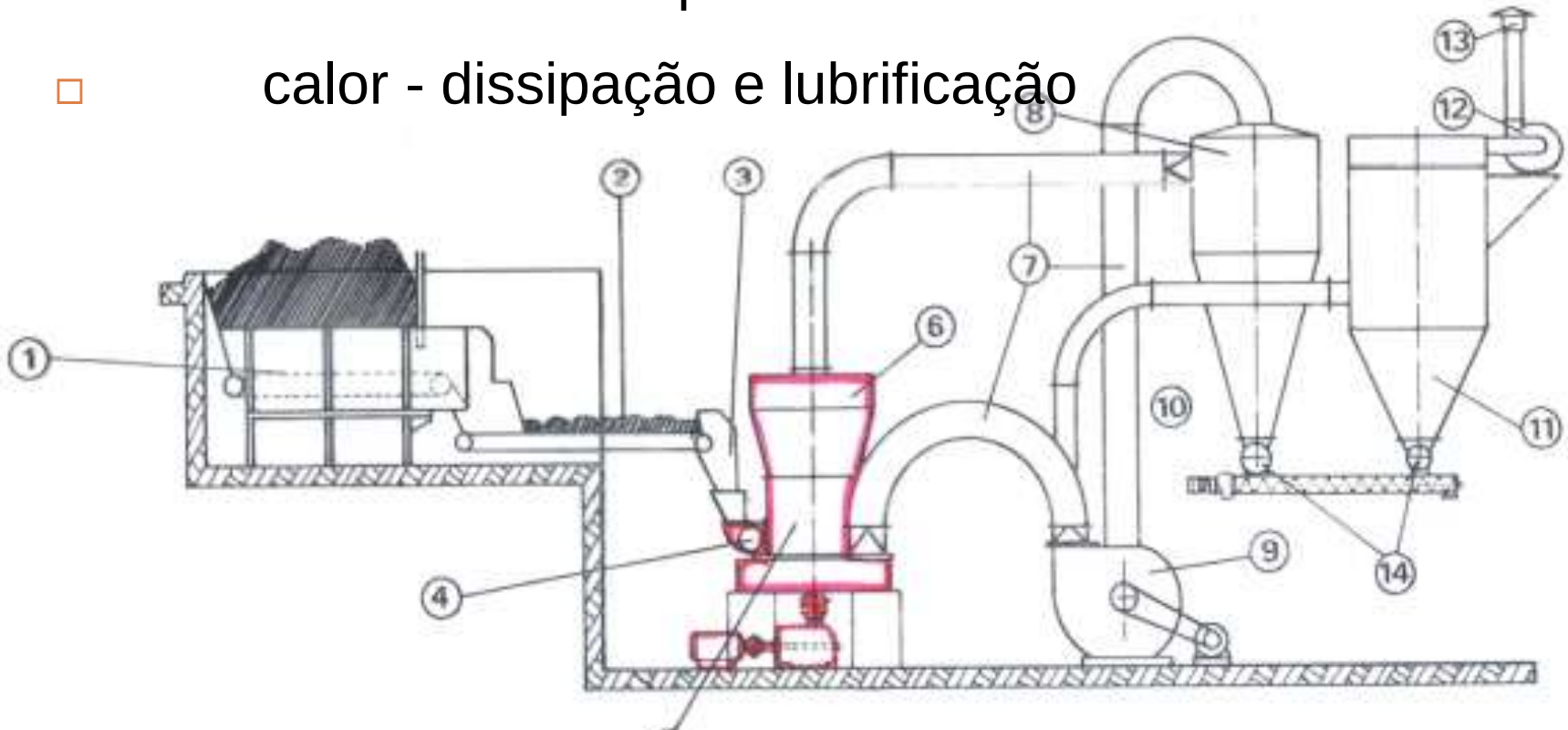
- Moagem a úmido:
  - Consome menos energia, cerca de 75% da moagem a seco;
  - Transporta a polpa e abate poeiras, eliminando equipamentos periféricos;
  - Dissipa o calor gerado na moagem;
  - O seu produto é mais homogêneo.

Moagem – via seca ou úmida

- vantagem da cominuição via seca:
  - diminuição do desgaste (menor corrosão)
  - minérios e minerais muito abrasivos,
  - minerais que não podem ser contaminados c/ ferro
  - materiais que reagem com a água
  - possibilidade de secar o material no moinho

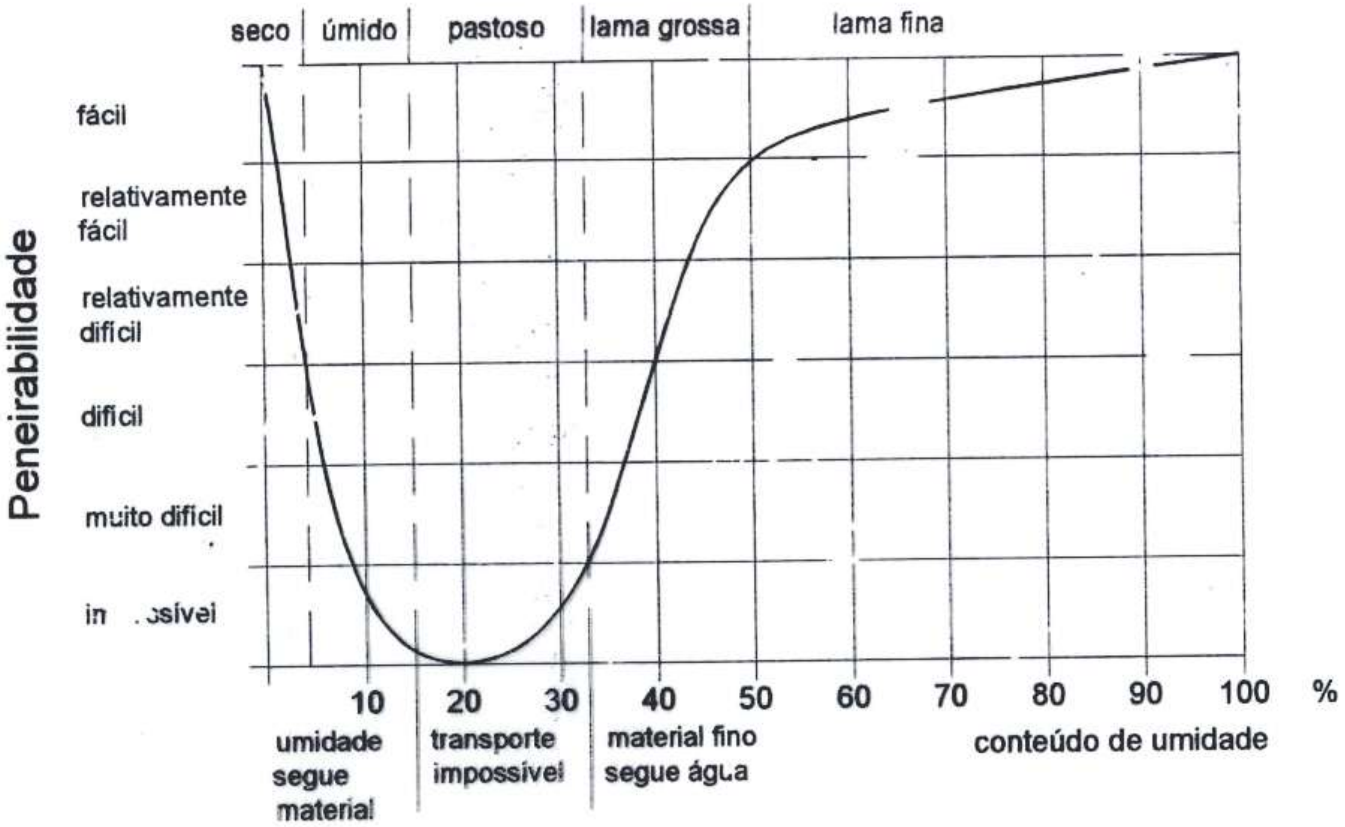
Moagem – via seca ou úmida

- problemas da cominuição via seca:
  - transporte
  - abatimento das poeiras
  - calor - dissipação e lubrificação



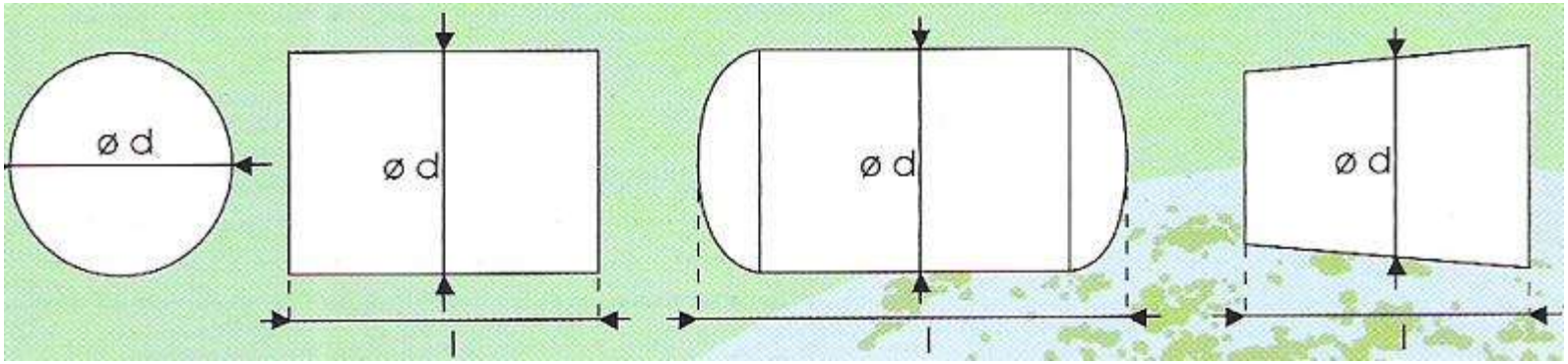
Moagem – via seca ou úmida

- efeito da umidade nas peneiras vibratórias: na moagem é idêntico.



Fonte: Chaves, 2006.

Moagem – tipo de corpo moedor



- ✓ barras => para moagem grosseira e à seco;
- ✓ bolas => para aplicação à seco e à úmido (tamanho comercial = de 3/8” a 5”);
- ✓ *cylpebs* => na moagem fina (tamanho comercial = 53 mm);
- ✓ *boulpebs e conipebs* => na moagem fina (tamanho comercial = 38 mm).

Fonte: Torquato, 2007.

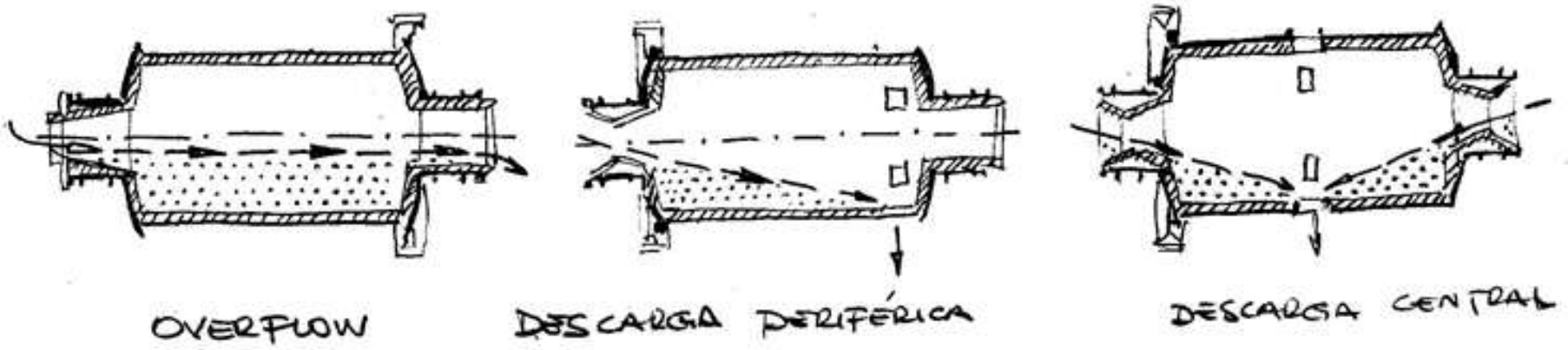
Moinho de barras

- moinhos tubulares – barras – F = ¾ a 3/8”, P = 4,75 a 0,6 mm
- L/D > 1,25 – 1,4 a 1,6 recomendados
- Menores velocidades

diâmetro interno (ft)	3 a 4	5	6 a 8	9 a 10,5	>=11
% VC	75 a 80	72 a 72,5	69	64 a 68	61 a 65

- Maior tamanho de barras: 20 ft – prevenção de deformação e quebra;
- Maiores moinhos: 4,5 x 6 m;

Moinhos de barras



RR = 15 a 20

RR = 12 a 15

RR = 4 a 8

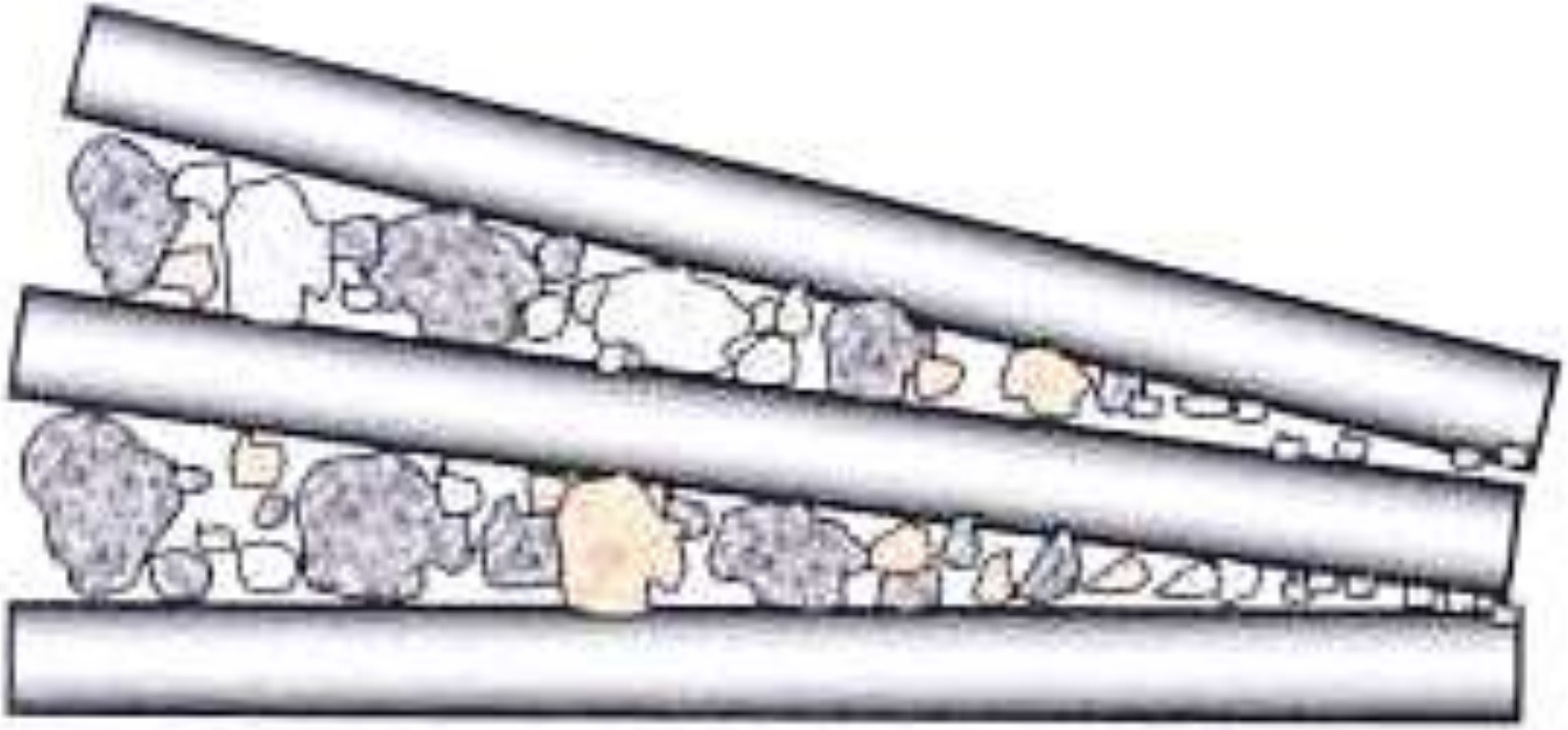
Fonte: Chaves, 2006.

Moinhos de barras

diâmetro		peso	
polegadas	mm	kg/m	2
2 1/4	57,2	20,1	
2 1/2	63,5	24,8	
2 3/4	69,9	30,1	
3	76,2	35,8	
3 1/4	82,6	42,0	
3 1/2	88,9	48,7	
4	101,6	63,6	
4 1/2	114,3	80,5	
5	127,0	99,4	
5 1/2	139,7	120,2	
6	152,4	143,1	
6 1/2	165,1	167,9	
7	177,8	194,7	

Fonte: Chaves, 2006.

moinhos de barras



ação das barras

Fonte: Chaves, 2006.

Moinho de barras

- Gera material muito bitolado – operação em circuito aberto!
- Dificuldade em gerar produto muito fino;
- Não necessita de escalpe – finos passam pelo moinho, ajudando apenas na adequação da densidade de polpa.

Moinho de bolas

- Moinhos tubulares – bolas – F = 1,2 a 0,6 P = ...

acionamento

alimentador

tromel de descarga

bases

Moinho de bolas

- moinhos tubulares – bolas
- L/D variável com o produto:

F (d_{80} da alimentação)	5000 a 1000mm	5000 a 1000mm	fina/remoagem
L/D	1 a 1,25	1,25 a 1,75	1,5 a 2,5
diâmetro da maior bola	2,5 a 3,5"	2,5 a 2"	$^3/_4$ a $1^1/_4$"

- Maior tamanho de bolas: aprox. 3,5";
- Maiores moinhos: até aprox. 8 m e diâmetro (Beraldo 5,4 m);
- Normalmente opera-se entre 65 e 80% da Vc e de 35 a 50% de enchimento de bolas.
- Corpos moedores forjados ou fundidas;

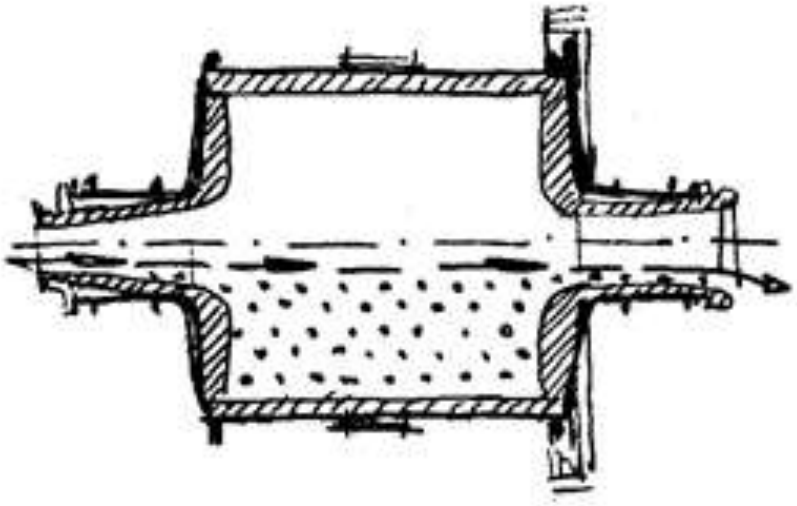
Moinho de bolas

DUDA [11] apresenta alguns dados de dureza e consumo de bolas de diferentes materiais (forjadas, exceto onde mencionado o contrário):

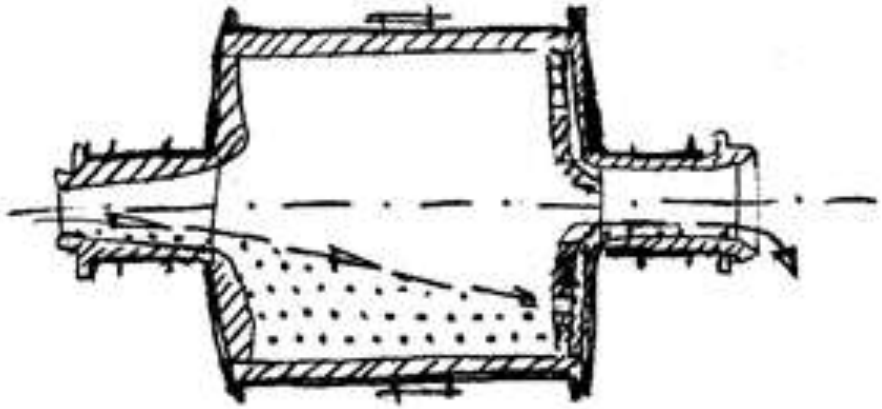
material	BHN	desgaste a seco, g/24h.cm^2	desgaste a úmido, g/24h.cm^2
SAE 1095	739	0,000314	n.d.
SAE 1060 modificado	705	n.d.	0,00243
SAE 1045	587-613	0,000365	n.d.
SAE 5210		n.d.	n.d.
SAE 5165	442-487	0,000181	n.d.
AISI 440C (inox)	666-722	n.d.	0,00181
Cr - Ni, fundido		n.d.	n.d.
baixo Cr, fundido	546-613	0,000011	0,00220

Fonte: Chaves, 2006.

Moinho de bolas

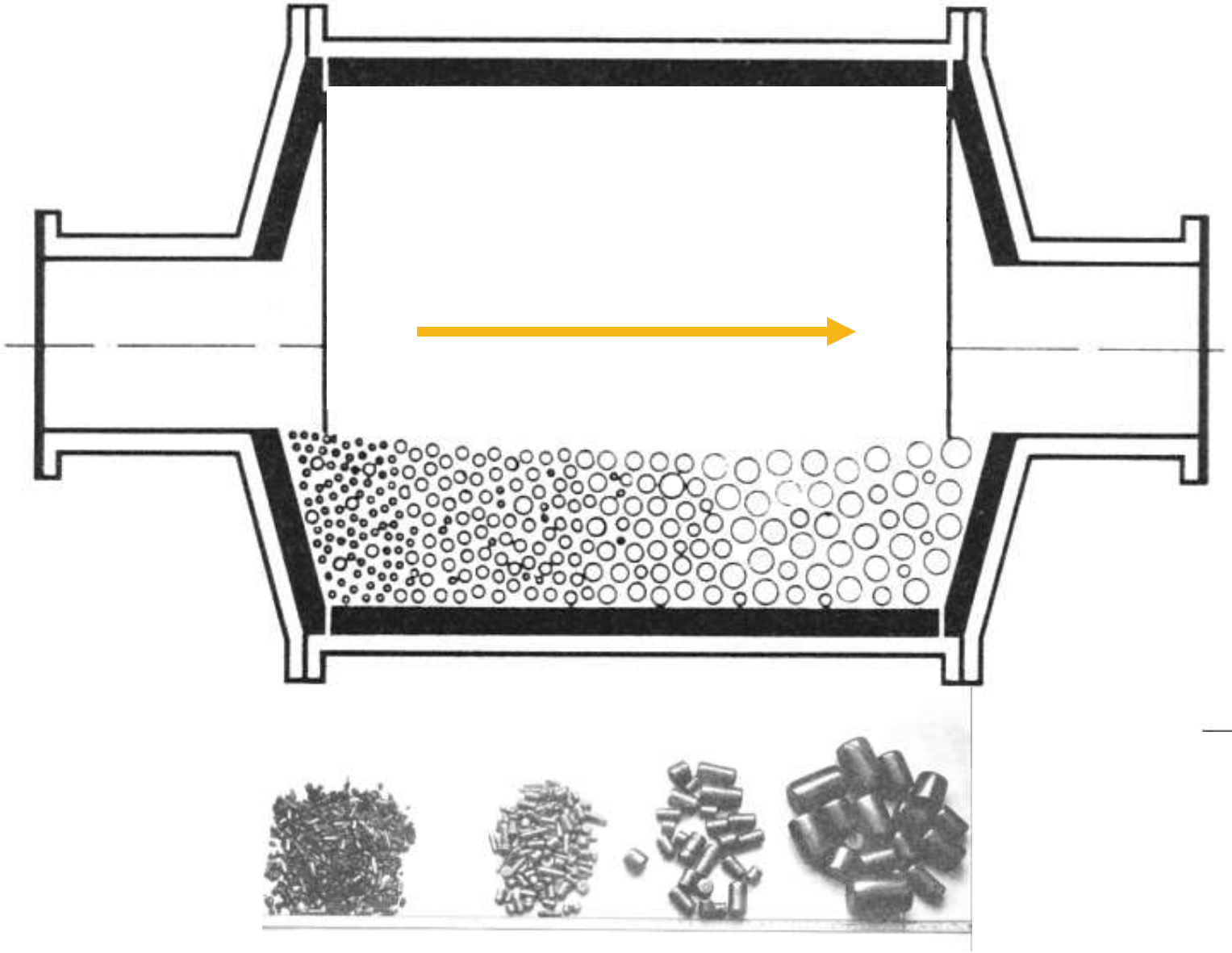


- Dispositivo para controlar saída de bolas;



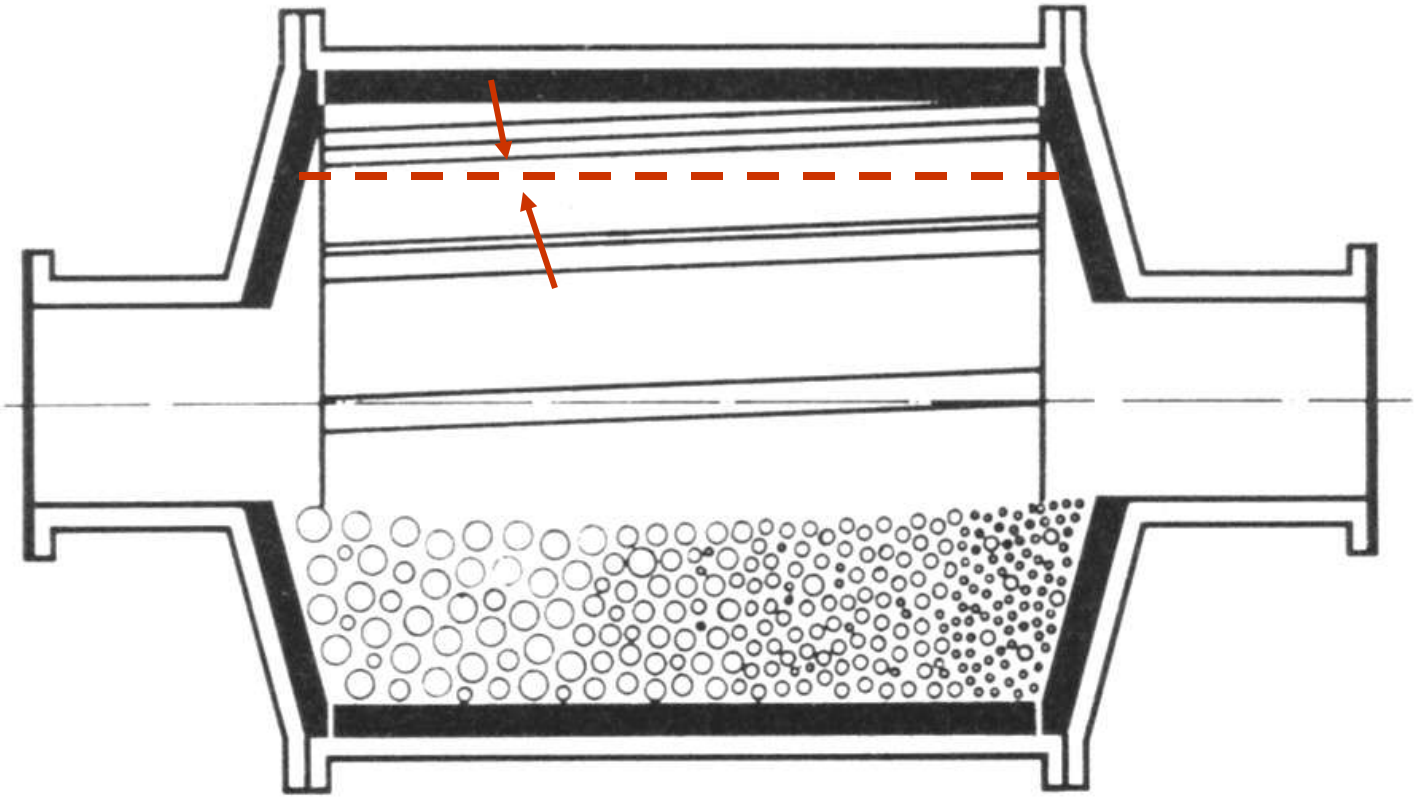
- Alimentações mais grosseiras;
- Minimizar geração de finos;
- Maior consumo de potência – 15 a 20%;
- Maior consumo de corpos moedores;
- Risco de entupimento;

moagem segregação dos corpos moedores



Fonte: Chaves, 2006.

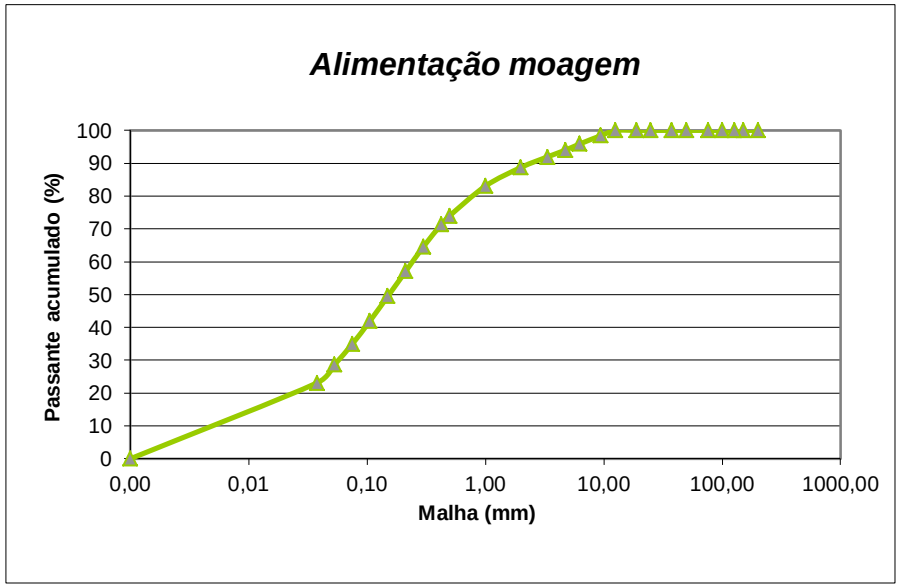
moagem controle da segregação dos corpos moedores

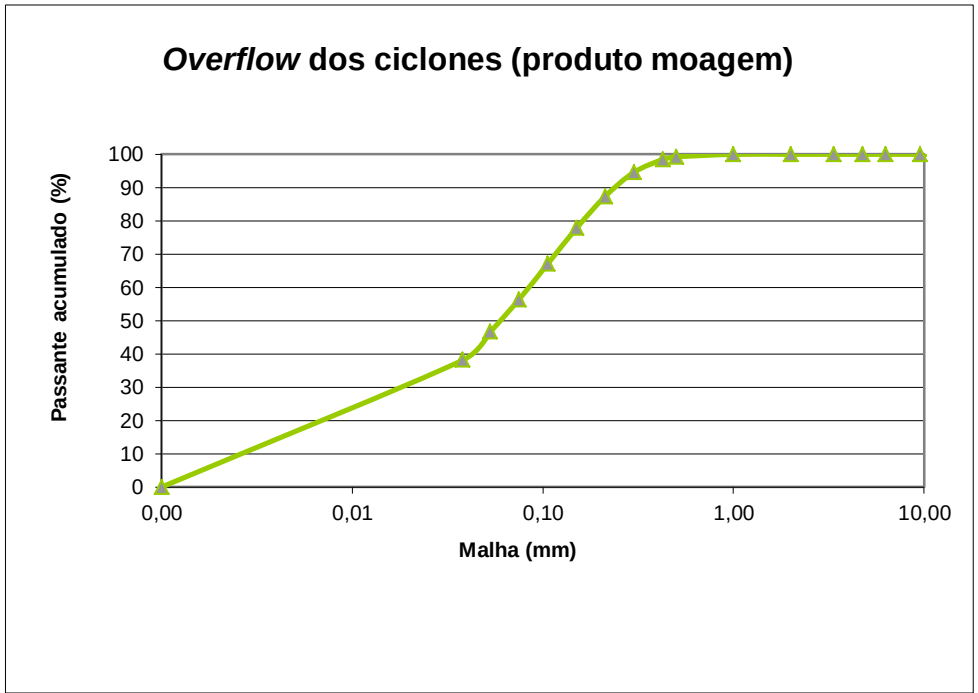


Fonte: Chaves, 2006.

Moinho de bolas

21) Dada a distribuição granulométrica de alimentação e produto de um circuito de moagem, calcular a relação de redução considerando o F_{80} e P_{80} do moinho.





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
- VALADÃO, G; ARAUJO, A. C. **Introdução ao Tratamento de Minérios.** Belo Horizonte: UFMG. 2007.
- Imagens do autor