

MODELO OPERACIONAL

ENGENHARIA DA COMINUIÇÃO

SUMÁRIO EXECUTIVO

Alexis P. Yovanovic

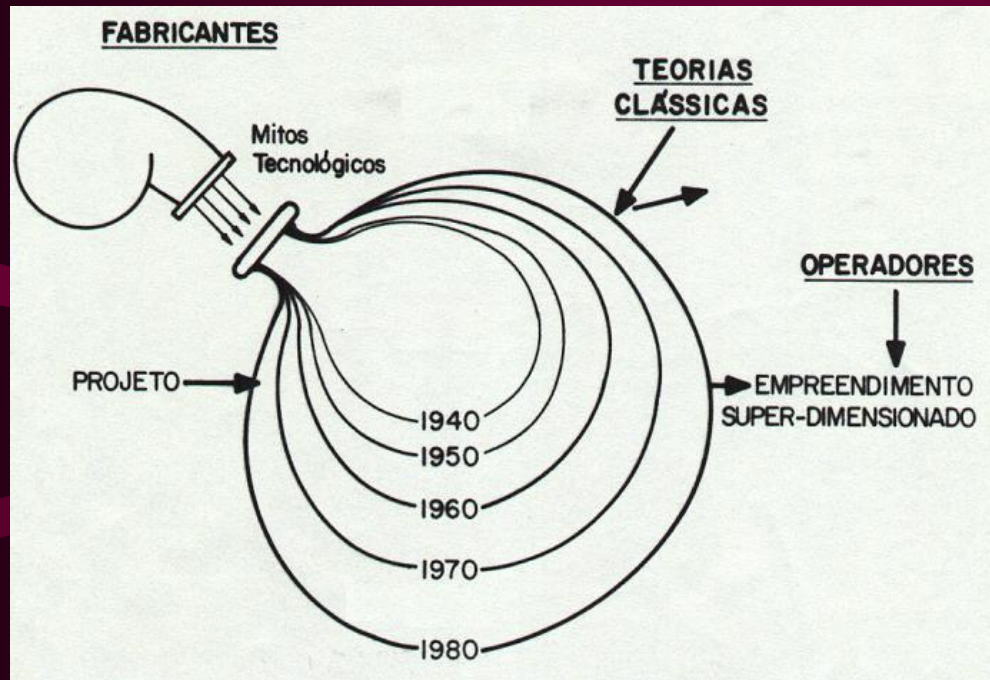


SITUAÇÃO ATUAL

As Operações de Beneficiamento Mineral Carecem de Fundamento Teórico e de Bases Fenomenológicas para o Dimensionamento, Controle e Otimização dos Processos.



SUPERDIMENSIONAMENTO



Existe hoje um único fabricante mundial de grandes equipamentos de cominuição



MITOS TECNOLÓGICOS



- Gigantismo
- Moagem Semi-Autógena
- Alto Nível de Enchimento
- Circuitos Fechados
- Alta Carga Circulante
- Outros



CUSTOS OPERACIONAIS

EEUU, Usinas de Moagem e Flotação

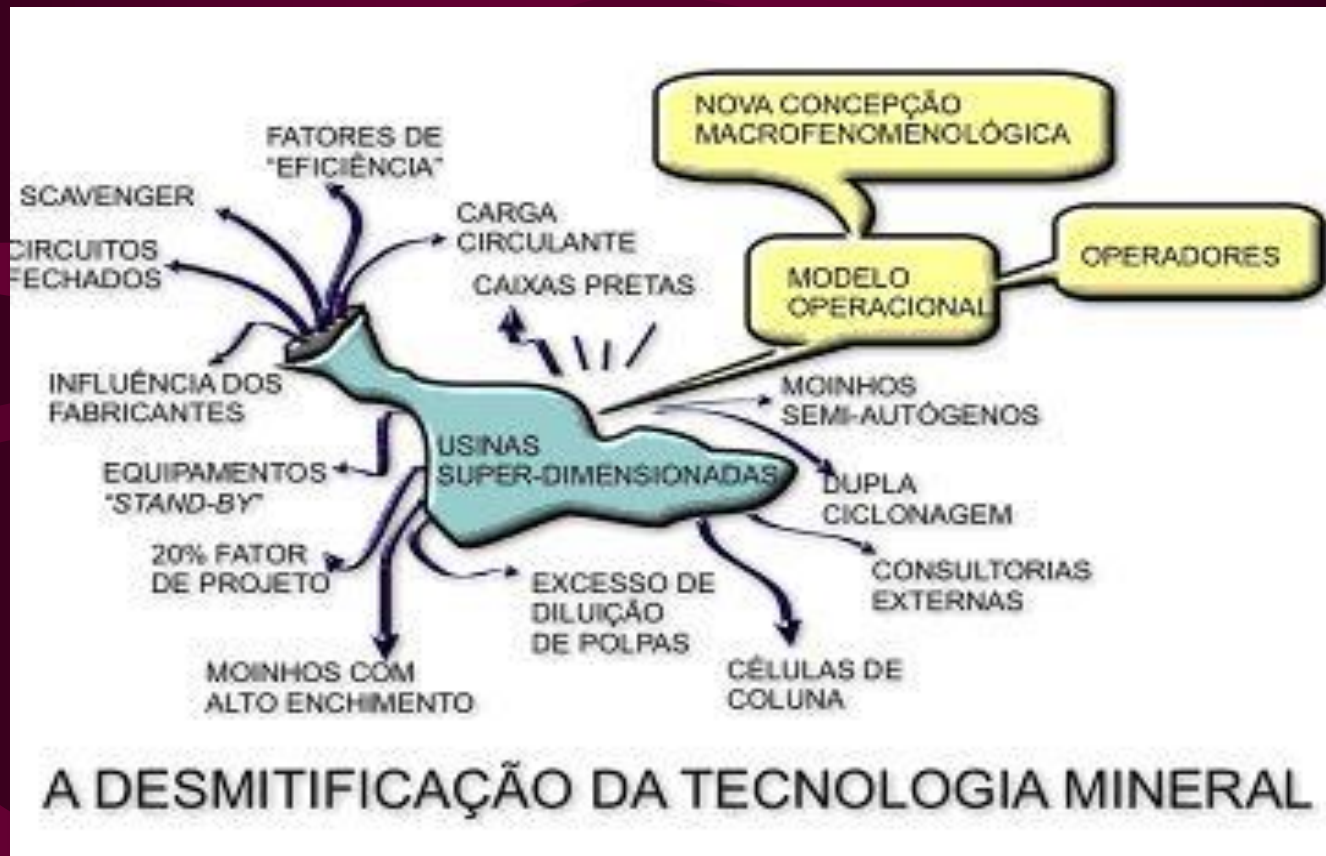
(Fuerstenau D.W., 1988)

Ano	Nº Usinas	Capacidade, 10 ⁶ t/ano	Água, m ³ /t	Energia, kWh/t
1960	202	179,9	4,67	17,8
1970	240	367,7	5,02	16,15
1985	179	383,5	9,35	20,23

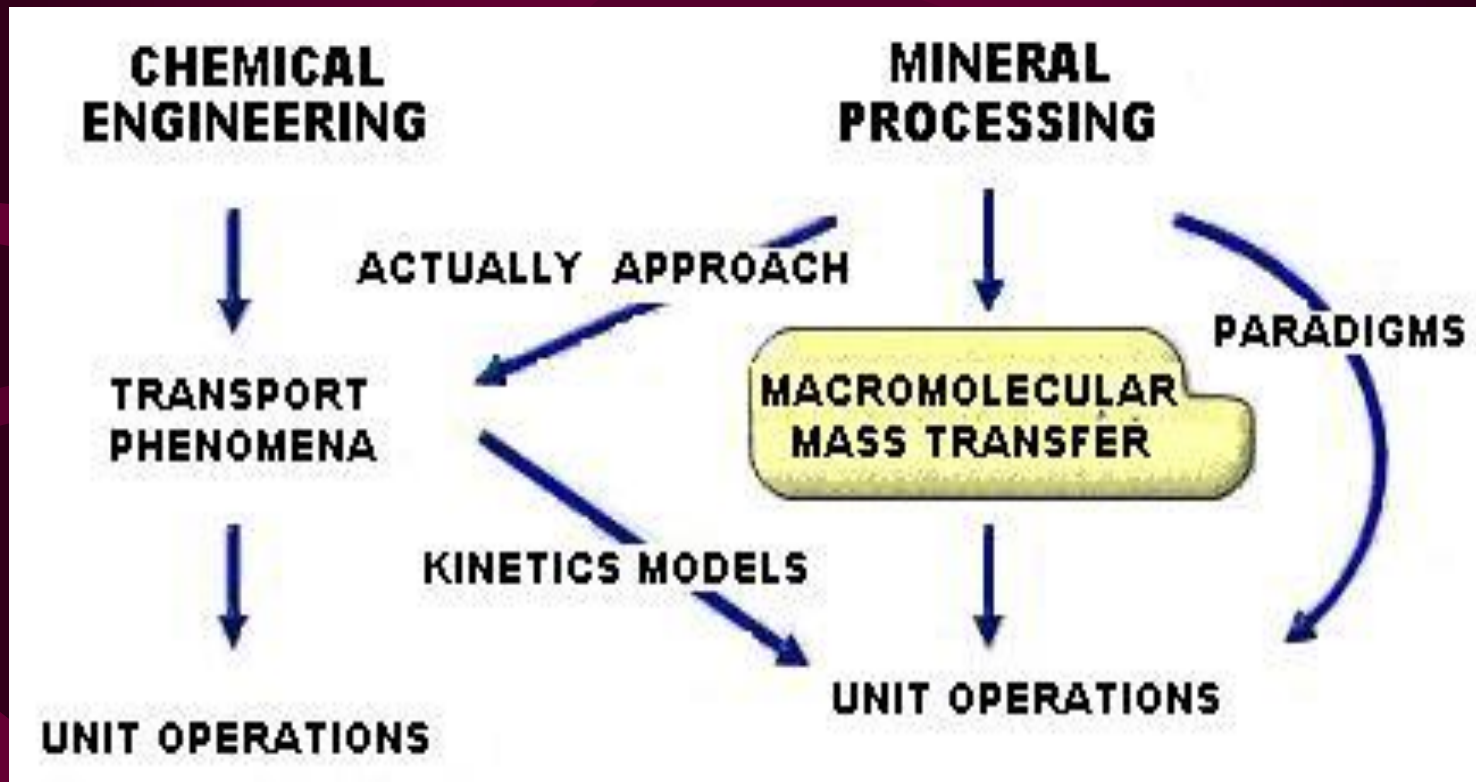


A QUEBRA DOS PARADIGMAS

MODELO OPERACIONAL



FENÔMENOS DE TRANSFERÊNCIA MACROMOLECULAR DE MASSA



MODELO OPERACIONAL

ENGENHARIA DA COMINUIÇÃO E MOAGEM EM MOINHOS TUBULARES



TRANSFERÊNCIA DE MASSA

Fundamentos do Modelo Operacional

FASE 1 → INTERFASE → FASE 2

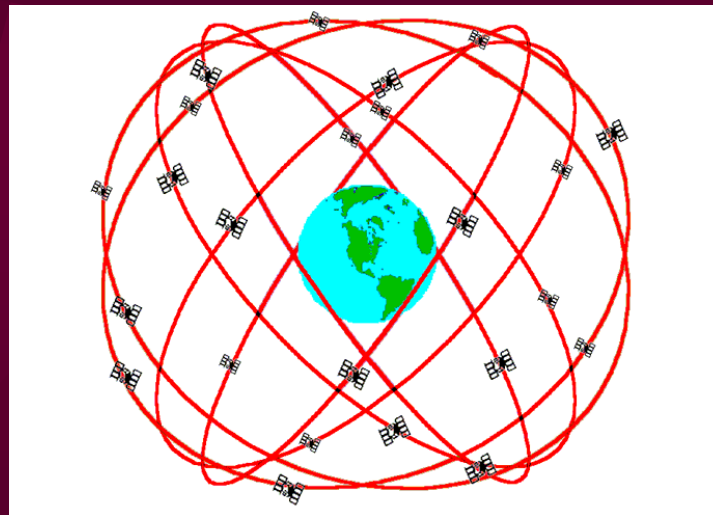
ALIMENTAÇÃO

PRODUTO



FUNDAMENTOS DO MODELO OPERACIONAL

1. Sistema Fenomenológico
2. Mecanismos Macroscópicos
3. Engenharia de Processos



1. SISTEMA FENOMENOLÓGICO

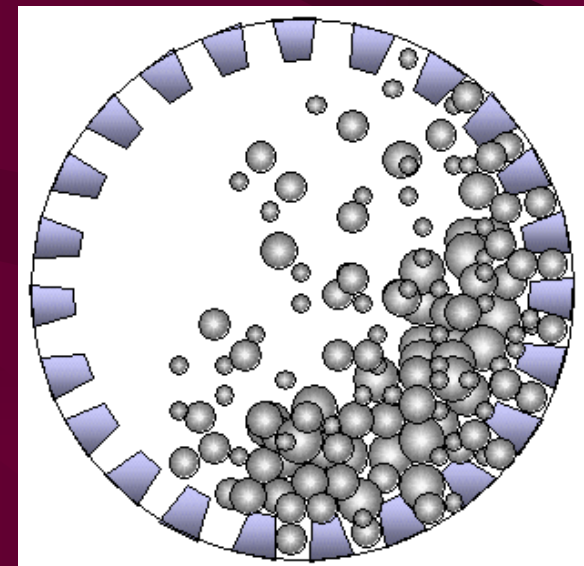
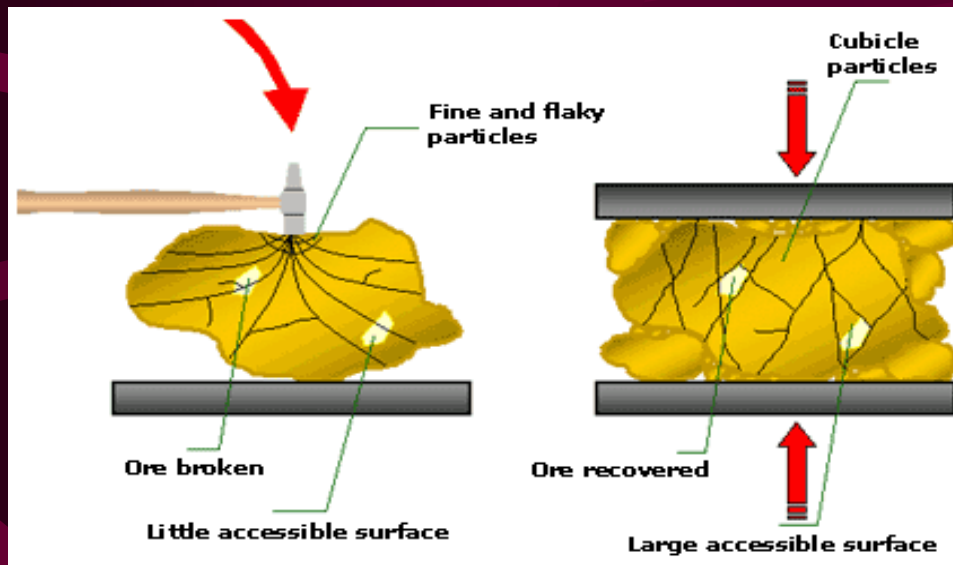
A Compreensão do Processo:

- Fenômeno Fundamental
- Transferência de Massa
- Recuperação do Produto



Fenômeno Fundamental

Quebra e Desagregação



Quebra

A rocha é uma dissolução em fase sólida de substâncias de interesse, dentro de uma solução de ganga.

O grão é unidade básica macromolecular do transporte.



Quebra

O grão está inserido na rocha, “dissolvido” em ganga e, junto com a aplicação de energia de cominuição, este grão acompanha os fragmentos da rocha cominuída, partículas estas cada vez de menor tamanho e com maior grau de liberação.



Liberação vs. Redução de Tamanho

A **rocha heterogênea** contém várias substâncias imersas, com características físicas diferentes, como gravidade específica, tamanho dos grãos e outras, e o objetivo da cominuição é a **liberação** das substâncias de interesse.



Exemplo de **materiais homogêneos** são o cimento e a Cal, onde a cominuição pretende apenas **reduzir o tamanho** geral das partículas.



Transferência de Massa

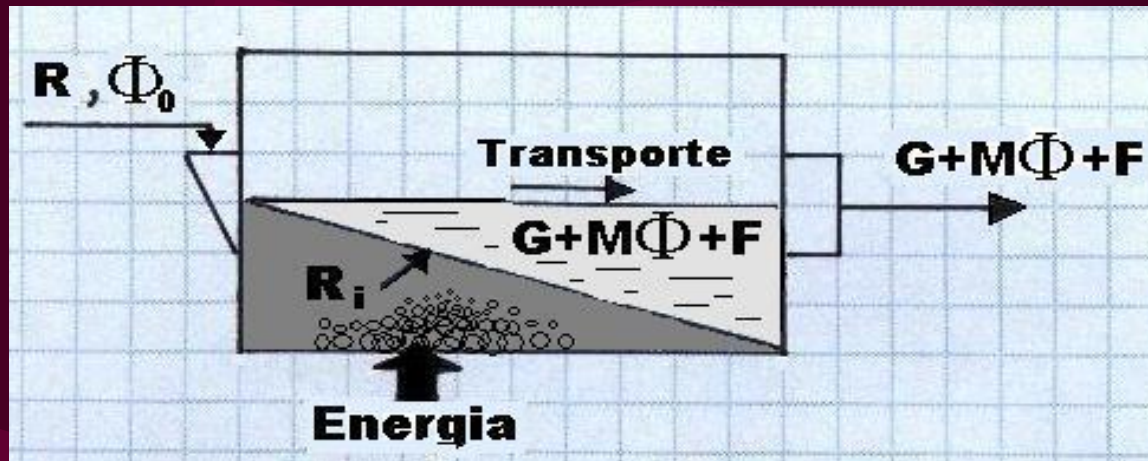
Equação de Transferência

Cominuição Homogênea:

$$F + \text{Energia} \rightarrow P$$

Moagem Seletiva:

$$R\Phi_0 + \text{energia} \rightarrow G + M\Phi + F$$



Transferência de Massa

Gradiente e Forças Impulsoras

Moagem:

$$N_x = t/h = K_x A_x \Delta E = K_t x A_t x (\Phi - \Phi_0)$$

ROCHA (Cominuição)

COEFICIENTE DE COMINUIÇÃO (K)

Tempo de Moagem (TZ)

Fator de Golpe - FG (Frequência)

Velocidade Crítica (VC)

ÁREA DE CONTATO BOLA/MINÉRIO

Nível Otimizado de Enchimento

= Volume Zona de Moagem

GRADIENTE DE ENERGIA

Diâmetro Interno (DI)

Tamanho do Corpo Moedor

POLPA (Transporte)

COEFICIENTE DE TRANSPORTE

Fluxo Mássico / t = Q

ÁREA INTERFASE ROCHA/POLPA

Área Superficial da Carga = f(L/D)

GRADIENTE DE TRANSPORTE

A partícula pode ser transportada quando atinge uma certa Liberação e Tamanho. T = f(SG, tamanho)



Recuperação do Produto

“Administração” do fenômeno fundamental.

Espaço que pertence, principalmente, ao operador da usina

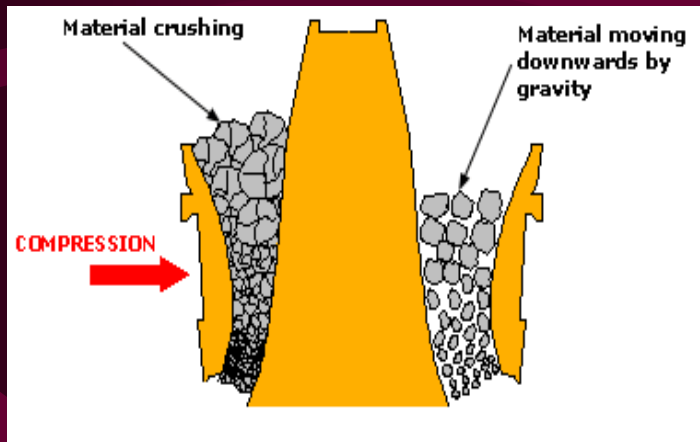
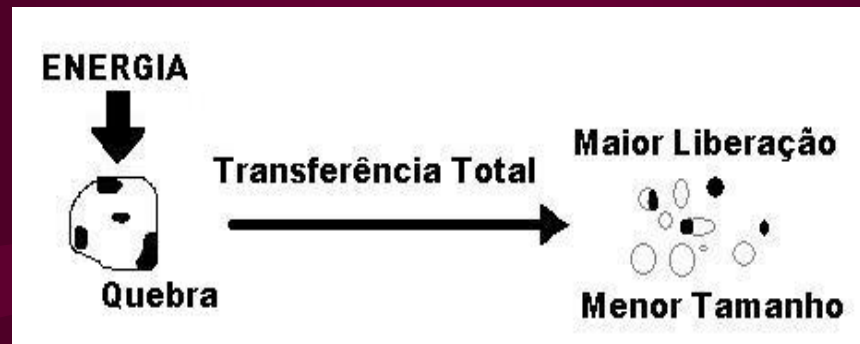


**FENÔMENO NATURAL +
OPERAÇÃO (Rec. Do Produto)
= FENÔMENO REAL**



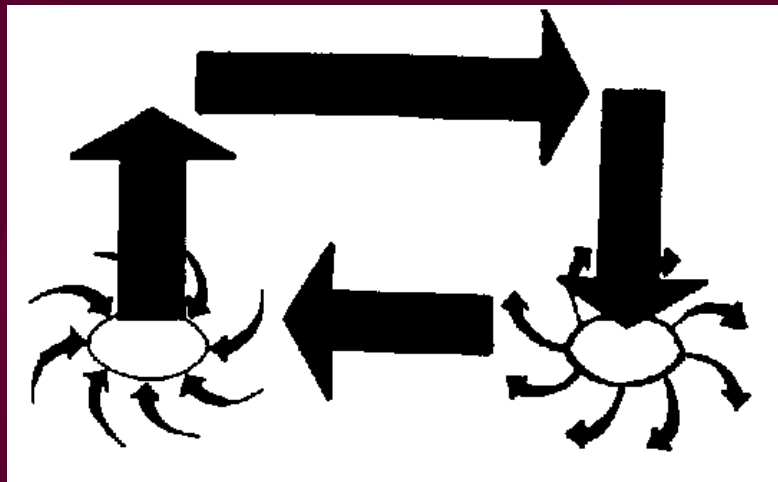
Recuperação do Produto

Cominuição – recuperação total de massa



FUNDAMENTOS DO MODELO OPERACIONAL

1. Sistema Fenomenológico
2. Mecanismos Macroscópicos
3. Engenharia de Processos



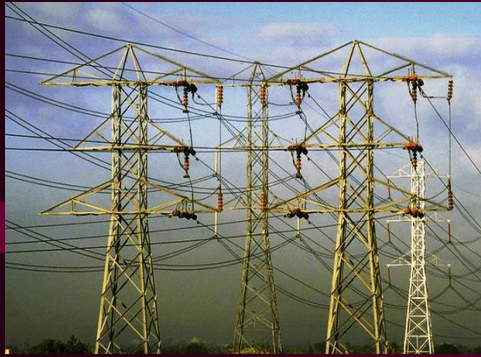
2. MECANISMOS MACROSCÓPICOS

Parâmetros Quantificáveis:

- Aplicação de Energia
- Cinética
- Seletividade



Aplicação de Energia



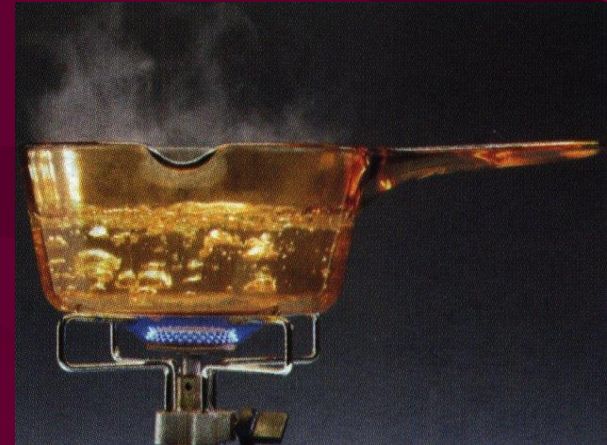
Aplicada à fase original, promovendo a ocorrência do fenômeno fundamental.

As partículas não migram naturalmente, como acontece com as operações moleculares, mas de maneira forçada.



Energia na Cominuição

A operação consiste em colocar em contato o material com os meios de moagem e transferir energia para o equipamento, como colocando uma solução em ebulição.



A operação é irreversível, e a transferência de partículas possui apenas o sentido rocha → polpa.



Energia e Dureza

A cominuição é como separar os grãos de amendoim de dentro de uma solução sólida de rapadura, de uma rocha doce chamada “**pé de moleque**”.



Energia e Dureza

A velocidade de liberação dos grãos depende da intensidade da energia aplicada e da dureza da rocha.

Os minérios “moles” precisam de menos energia para atingir o grau de liberação desejado.



Energia e Dureza

Se a solução de ganga fosse em base de mel com clara de ovo (torrone), a dureza desta “rocha” e a dificuldade para extrair os grãos é maior.



A condição de dura ou mole é da ganga que dissolve a substância e não da substância em si, cujo tamanho de grão faz consumir mais energia pela maior dificuldade de liberar a ganga em torno dele.



Energia e Dureza

Dureza da Andesita Primária (Yovanovic, 1975)

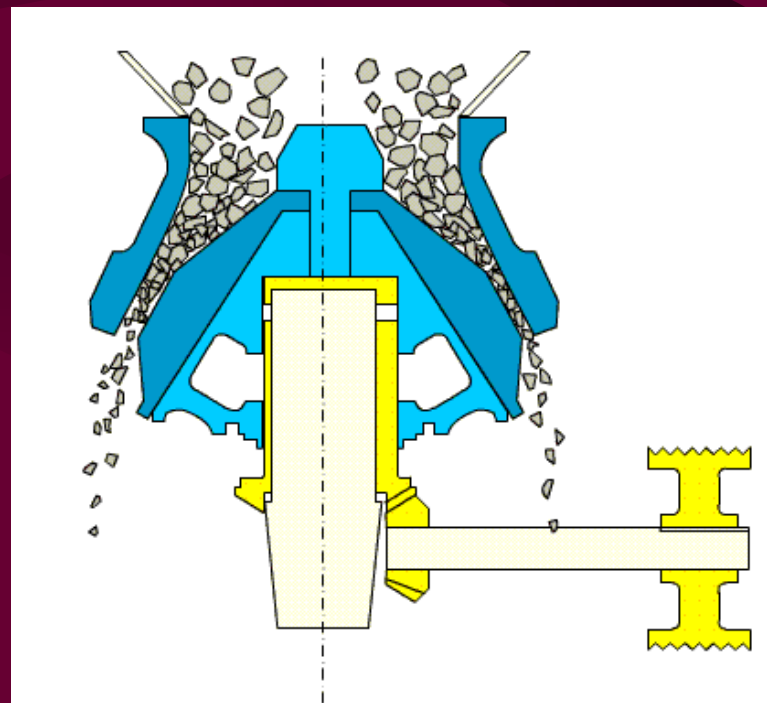
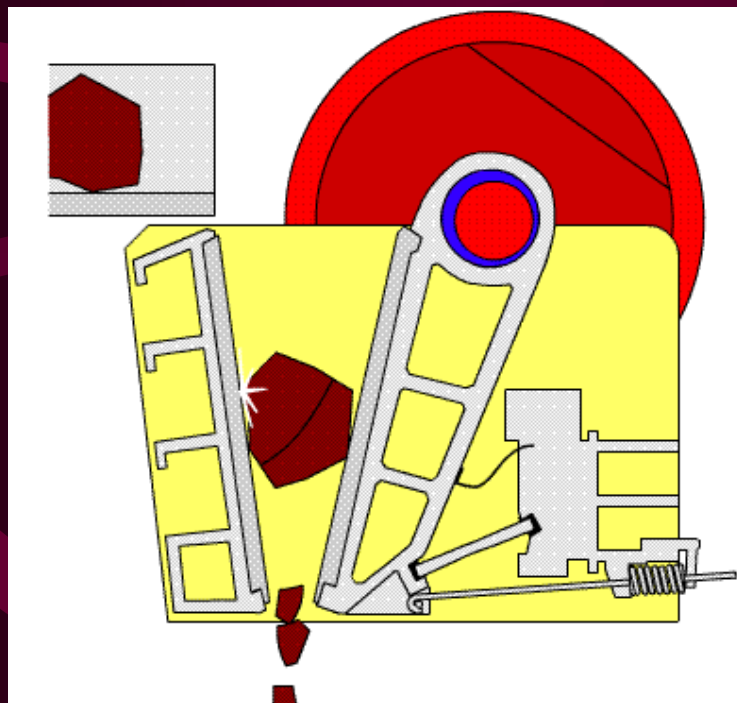
Textura da Andesita	Wi, kWh/st
Grossa	12,82
Media	14,35
Fina	15,24

A aplicação de energia é inversamente proporcional ao tamanho dos grãos, se desprendendo mais rápido as partículas de maior grão.



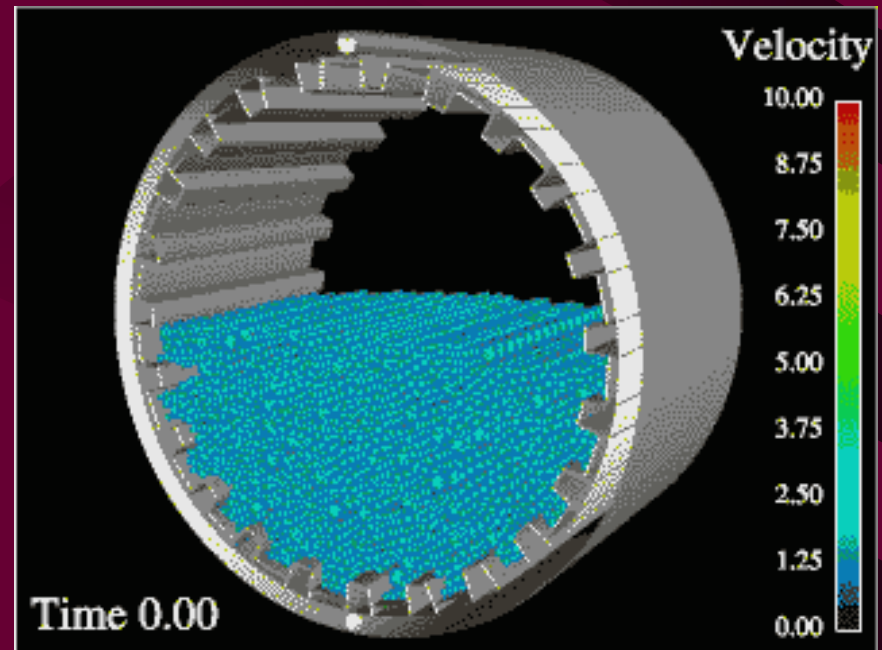
Energia na Britagem

A energia utilizada na **Cominuição** é do tipo mecânica, transferida ao minério mediante placas de impacto ou atrição (**britagem**).....



Energia na Moagem

..... ou mediante corpos moedores (**moagem**) que transferem esta energia de forma massiva, numa mistura de impacto, atrição e abrasão.

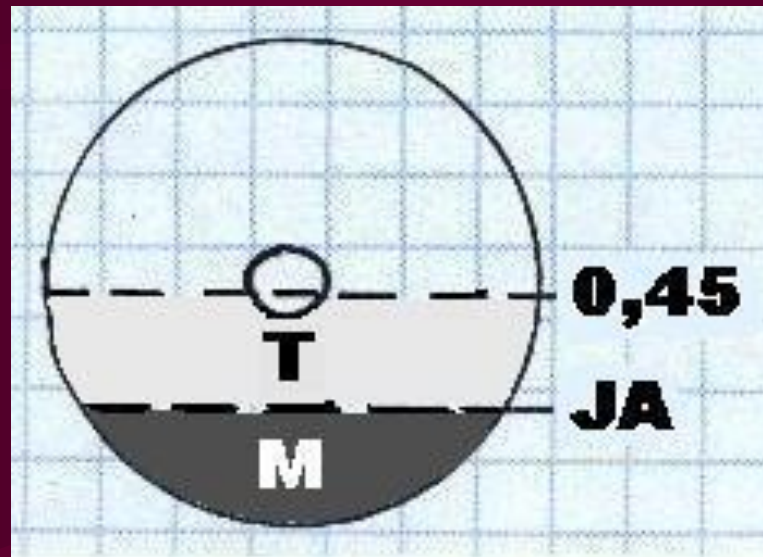


Aplicação Mecânica da Energia

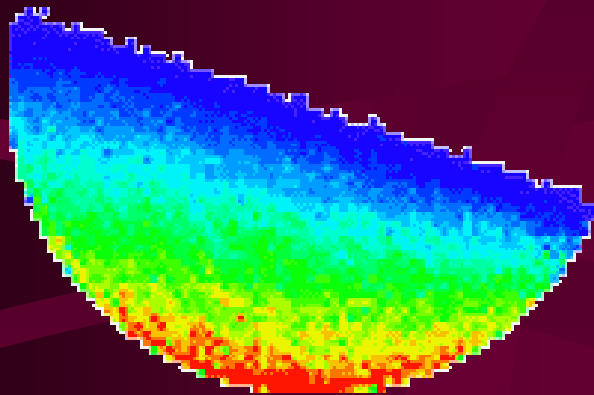
Densidade da carga

A maior parte dos modelos atuais considera como carga do moinho somente a carga de bolas

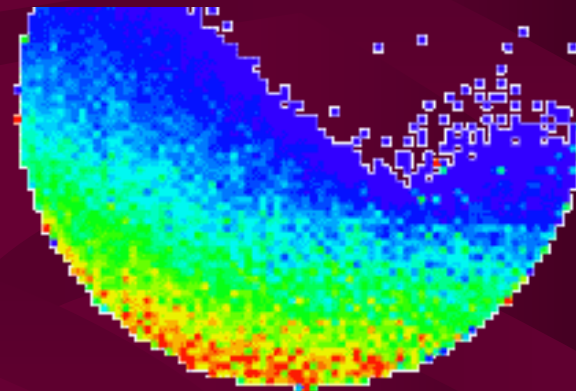
$$HP = f (L, DI, FV, DC) \quad , \quad HP \text{ gross}$$



Energia e Velocidade de Rotação



60 – 65% VC



70 – 75% VC

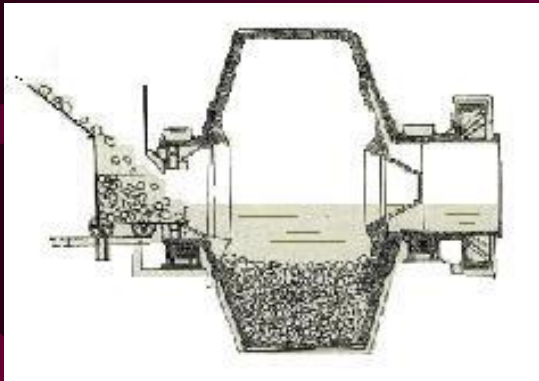
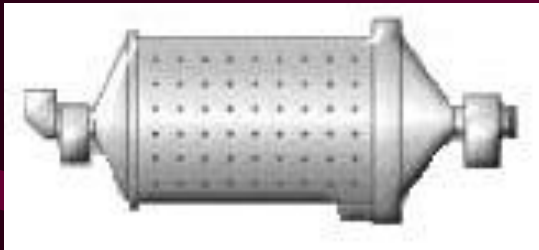


Racionalização Energética

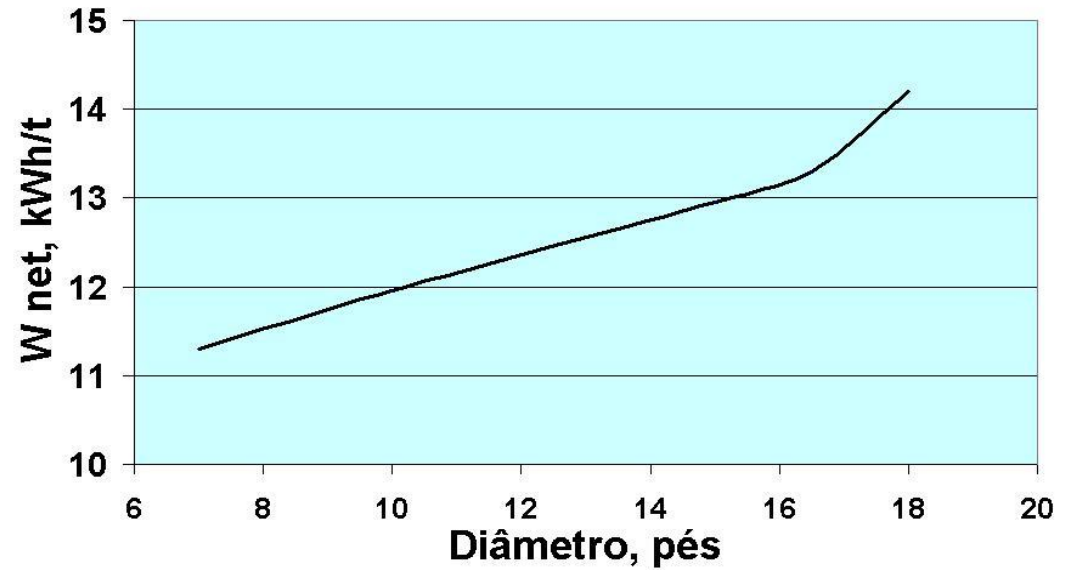
- Diâmetro Ótimo do Moinho
- Nível Otimizado de Enchimento
- Velocidade Ótima de Rotação
- Circuito Aberto



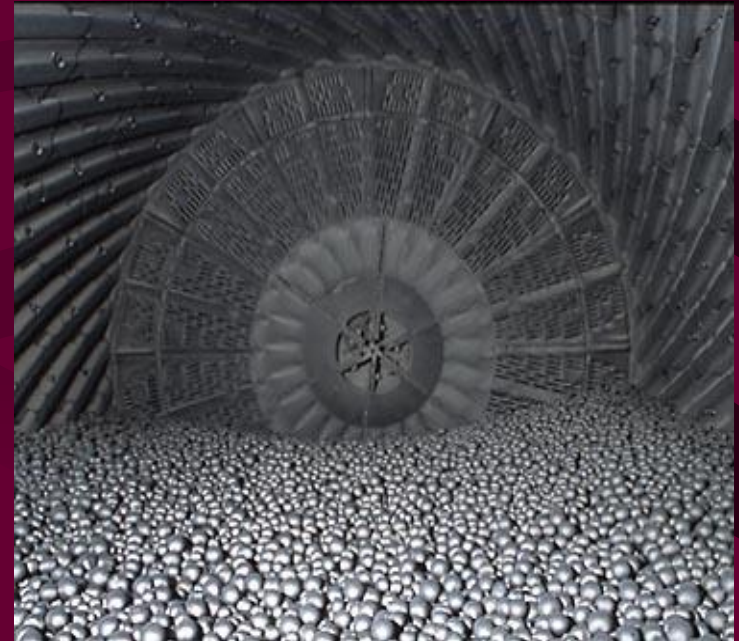
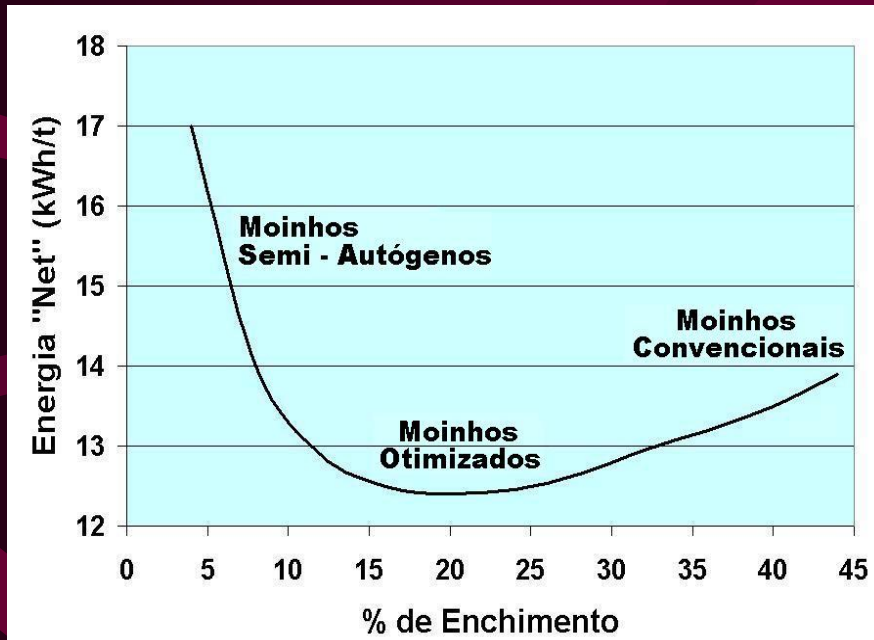
O Diâmetro do Moinho



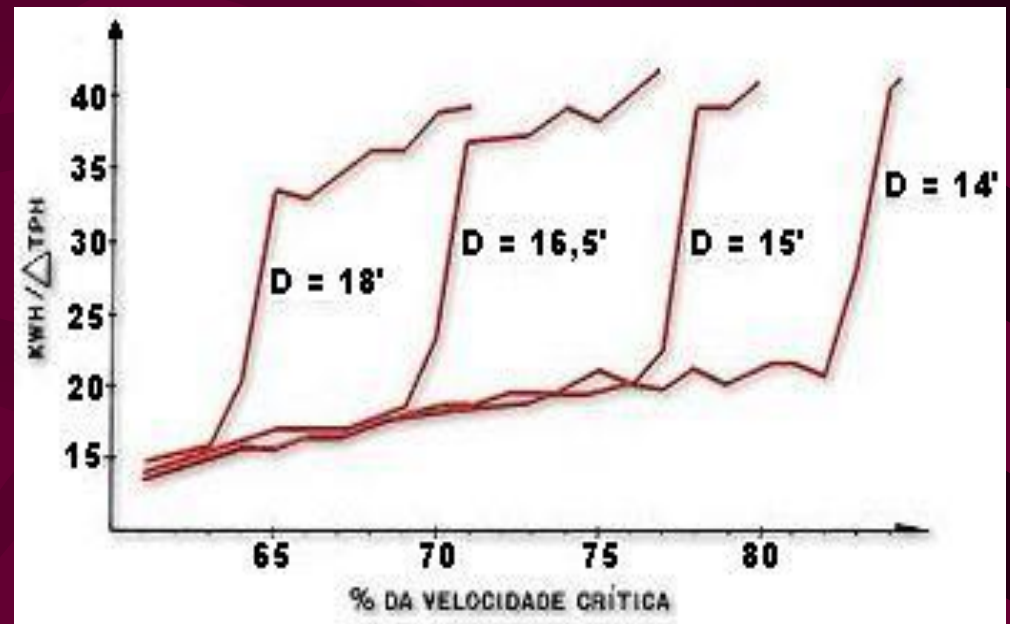
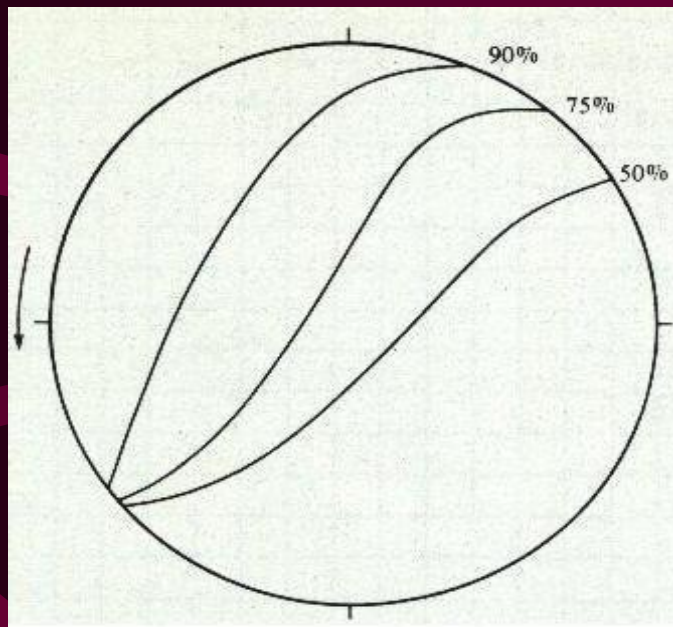
$W_i = 15,18$; $F_{80} = 14.438$ micras
 $P_{80} = 149$ micras; $SG = 3,15$; $NE = 38\%$



Nível de Enchimento

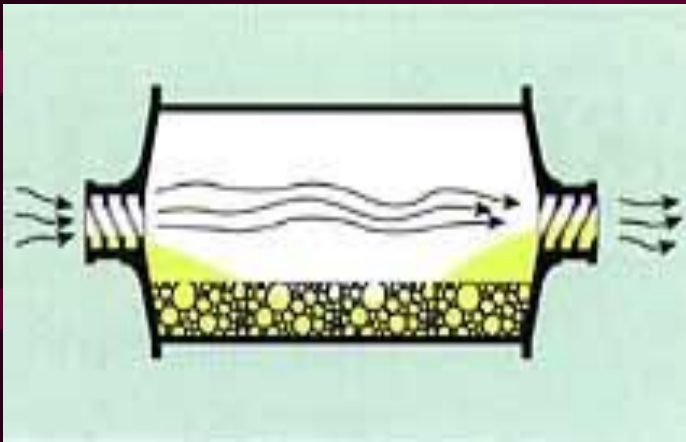


Velocidade de Rotação



Cinética do Processo

Velocidade de “reação”



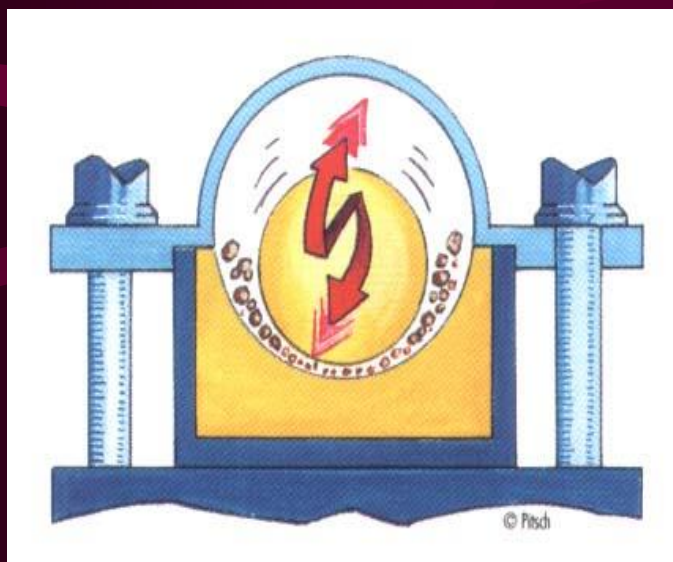
Quantidade de material que se transforma em produto, por unidade de tempo e de volume do equipamento de contato.



Velocidade da Reação de Moagem

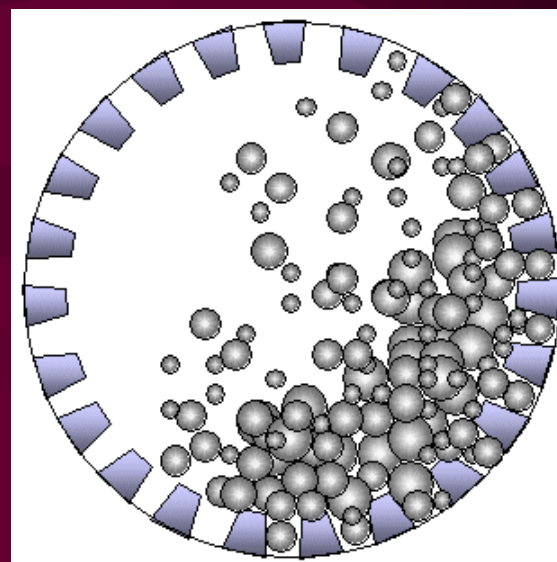
Colisão entre os corpos moedores e as partículas.

Intensidade



nível de energia aplicada

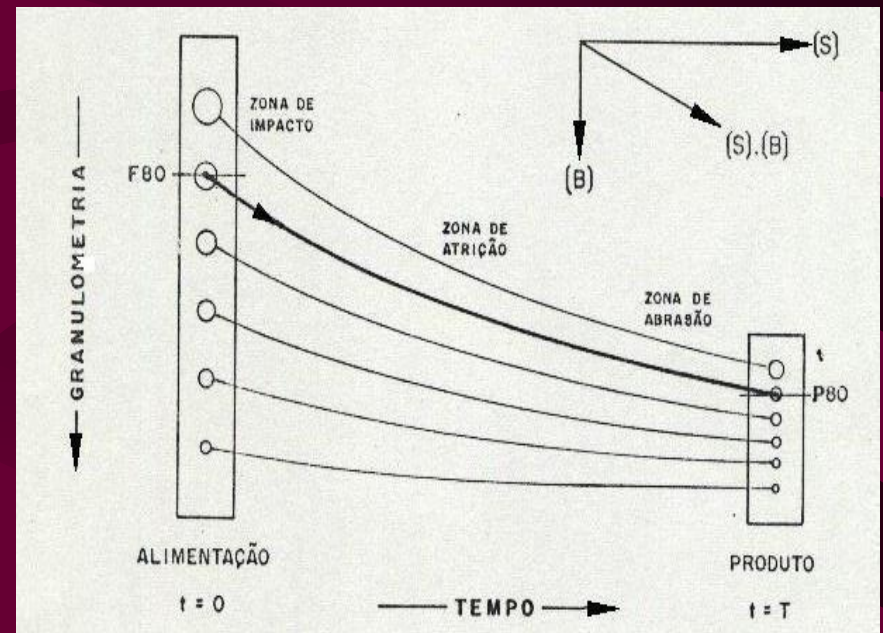
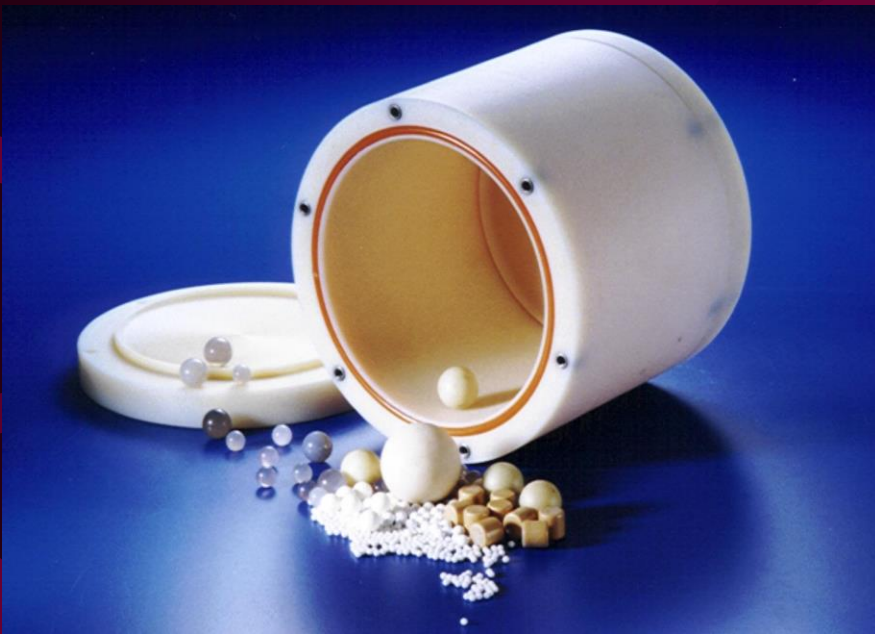
Freqüência



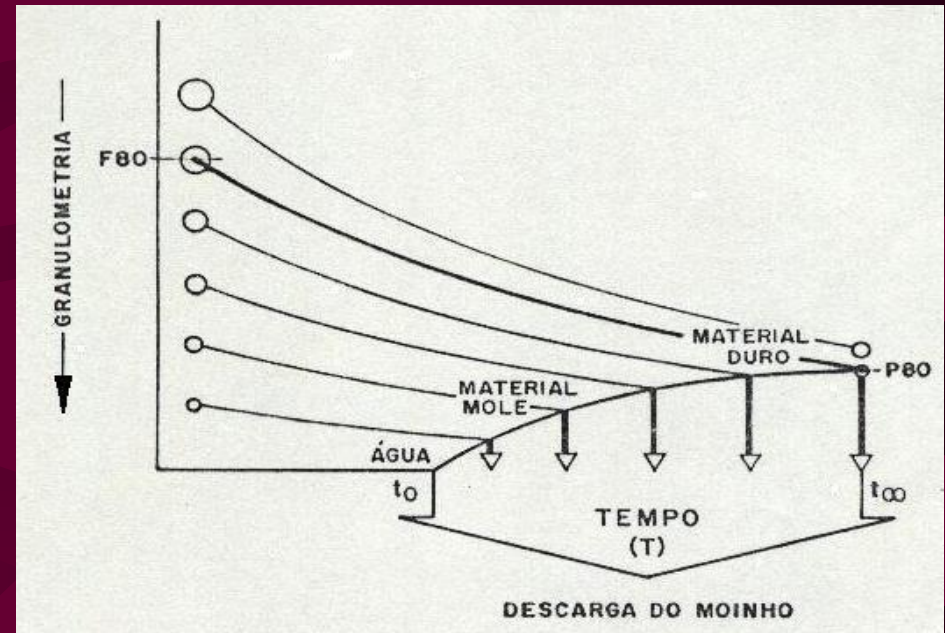
colisões por unidade de tempo



Processo por Batelada



Processo Contínuo



O moinho contínuo produz diferente distribuição granulométrica que o moinho de batelada.



Moagem Batch vs. Contínua

Moagem Minério Sulfetado XIX ENTMME – Recife 2002

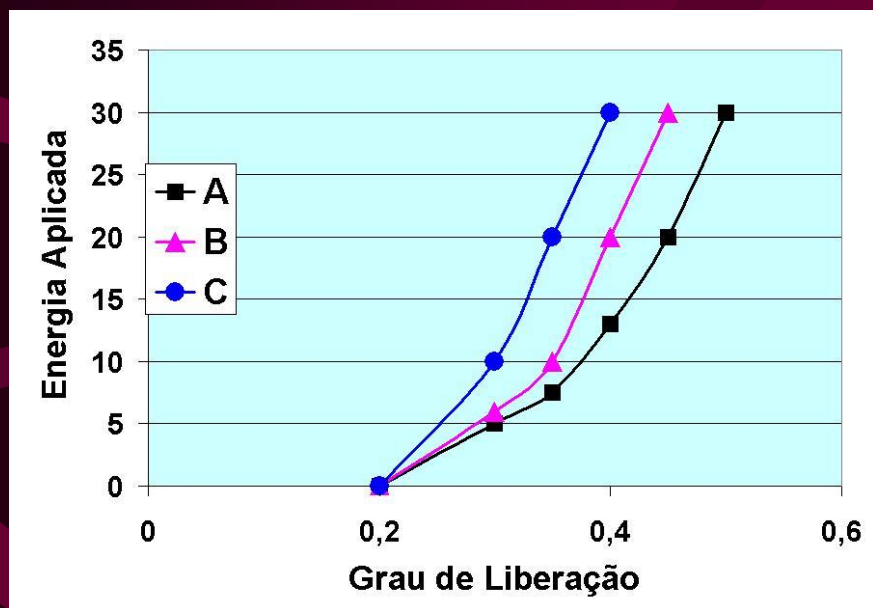
ITEM	BATELADA	USINA Circuito Fechado	USINA* Circuito Aberto
P80 Geral	55	70	> 90
P80 Sulfetos	70	60	60
			* Estimado

A moagem em aberto, com baixo enchimento, libera as partículas melhor que o clássico circuito fechado.

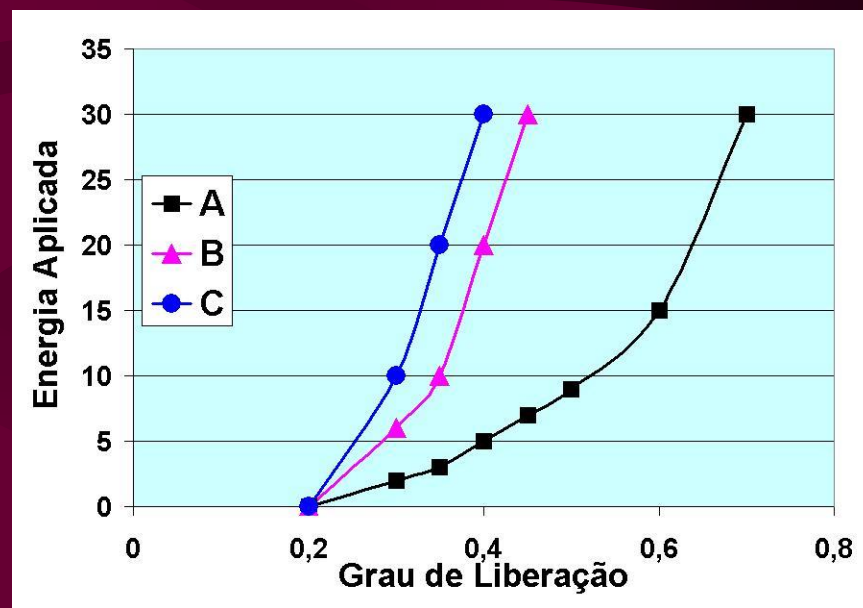


Seletividade

O grau de liberação atingido por cada uma das substâncias depende da heterogeneidade dos componentes da rocha.



Homogêneo

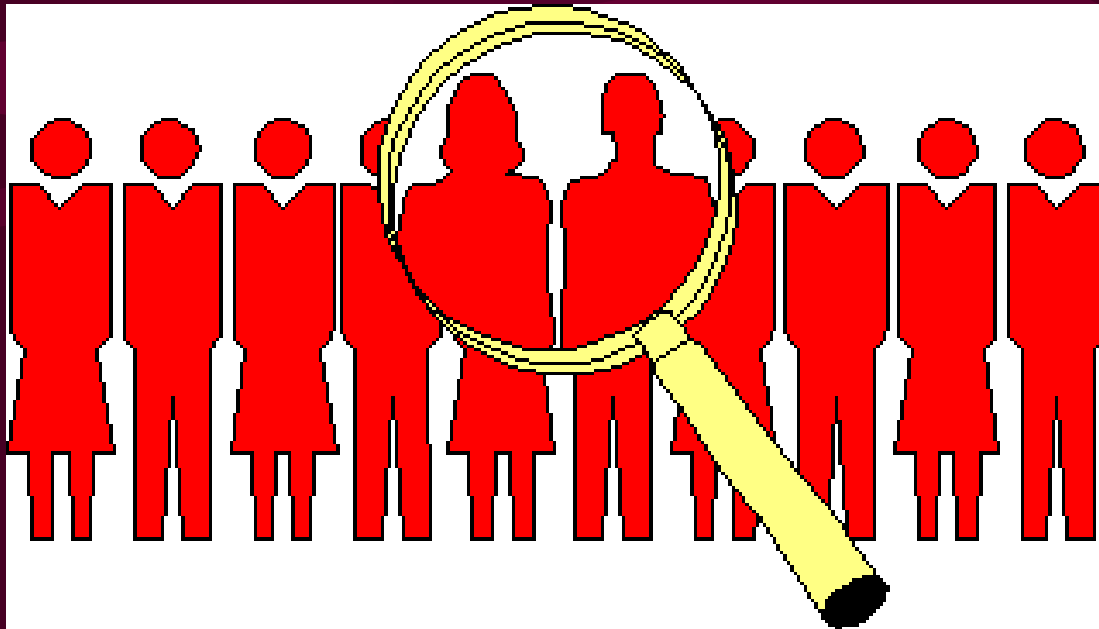


Seletivo



Operação Seletiva

Quando a substância de interesse é **liberada (cominuição)** preferencialmente frente a outras substâncias contidas na rocha.



Britagem Seletiva



A energia cinética entregue à rocha, no momento de atingir a placa de desgaste, cria uma força de reação, em sentido contrário.

Impacto

As substâncias mais pesadas recebem mais energia de reação.
As mais duras e com grãos menores precisam de mais energia.



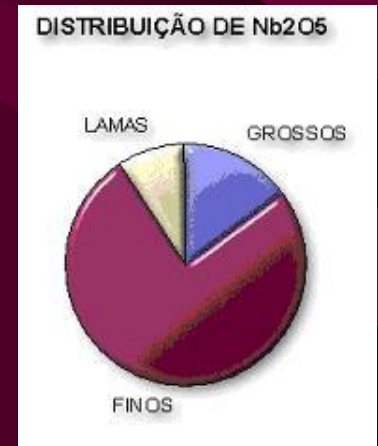
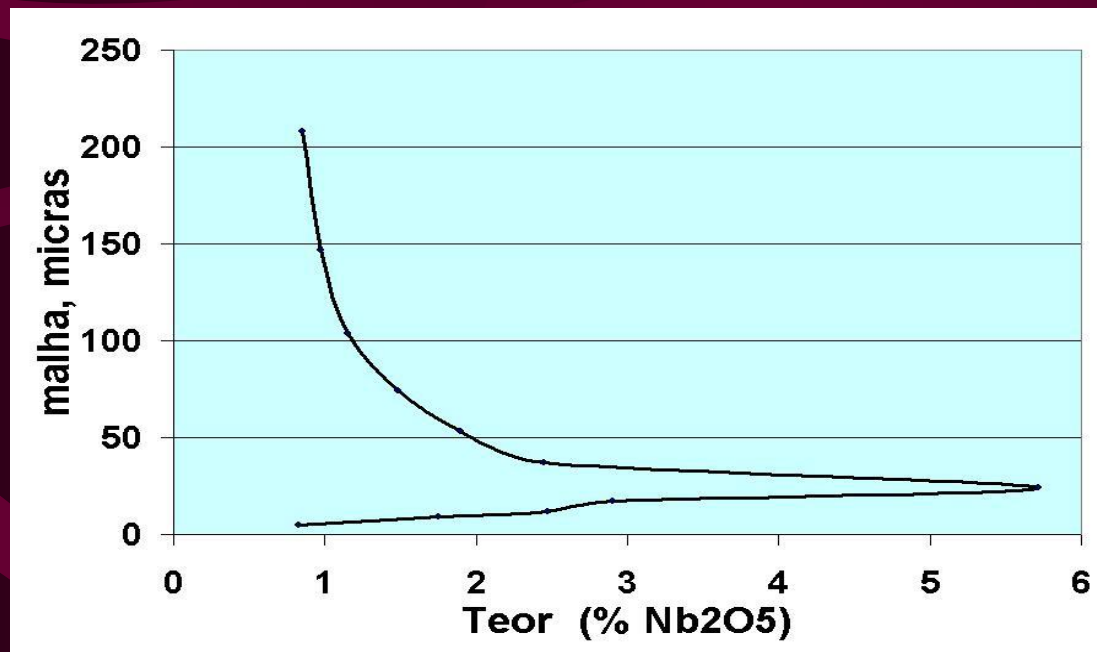
Pré-Concentração

Britagem Seletiva de Pirocloro (Yovanovic, 1988)

G = 32,15 % da massa, e $x_g = 0,55 \% \text{Nb}_2\text{O}_5$;

M = 54,92 % da massa, e $x_m = 1,58 \% \text{Nb}_2\text{O}_5$;

F = 12,93 % da massa, e $x_f = 0,83 \% \text{Nb}_2\text{O}_5$.



Pré-Concentração

Seletividade Natural na Britagem

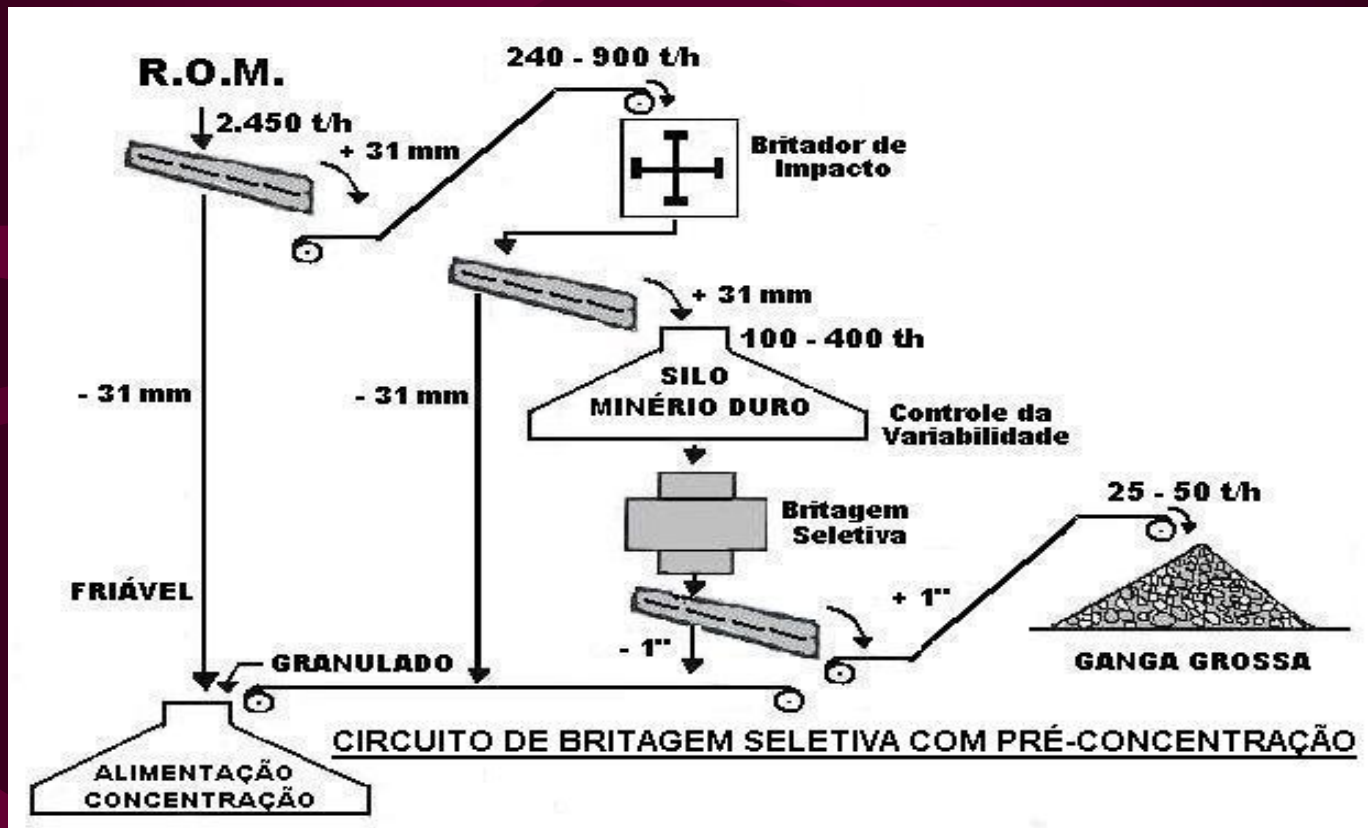
Descarga de Usina de Britagem (McIvor R.E. e Finch J.A., 1991)

TAMANHO	% EM PESO	TEOR, % Cu
+ 20 mm	4	2,1
+ 13 - 20 mm	22	2,1
+ 6 - 13 mm	28	2,2
+ 3 - 6 mm	12	2,4
+ 10# - 3 mm	9	2,8
+ 48 - 10#	12	4,0
+ 200 - 48#	5	4,8
- 200#	8	2,7
TOTAL	100	2,6



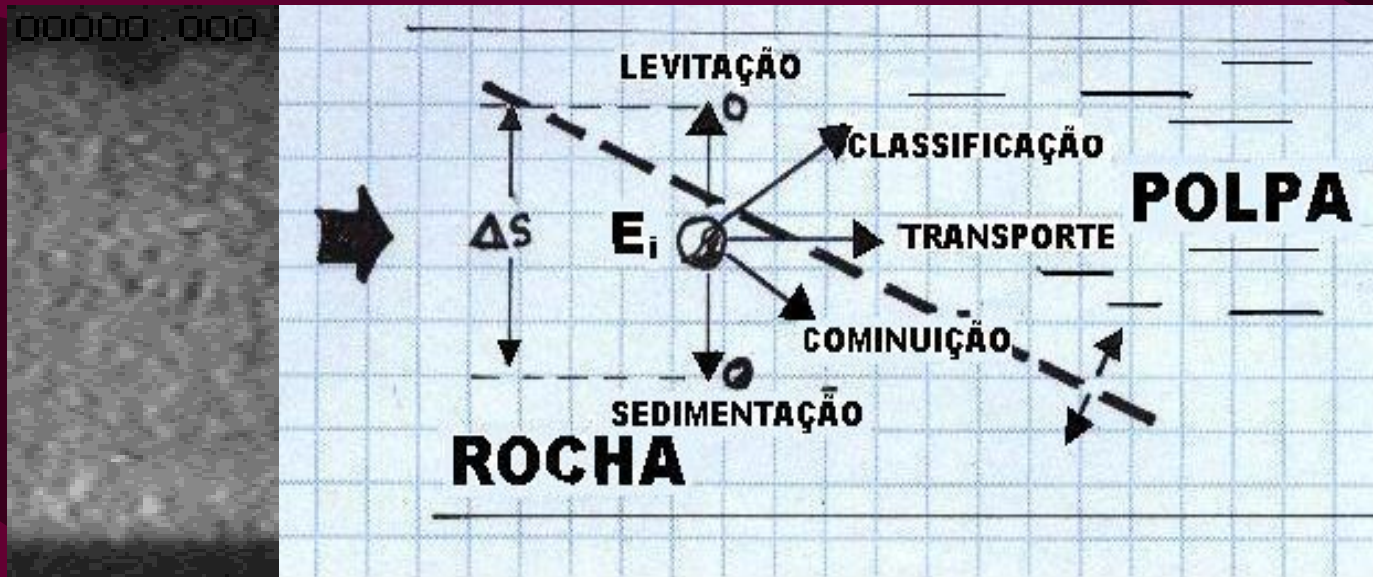
Pré-Concentração

Nem sempre toda a rocha extraída da mina é “minério”



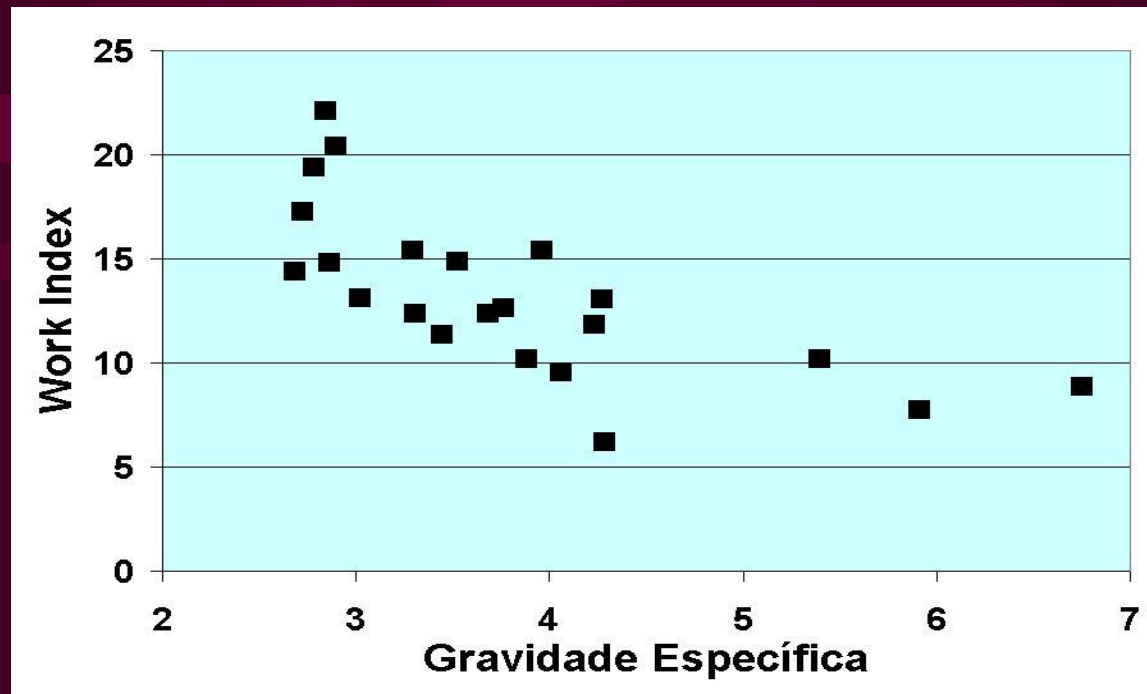
Moagem Seletiva

O gradiente proporcionado pela maior liberação dos grãos é a força impulsora que promove a transferência de partículas dentro do equipamento de moagem (***classificação interna***).



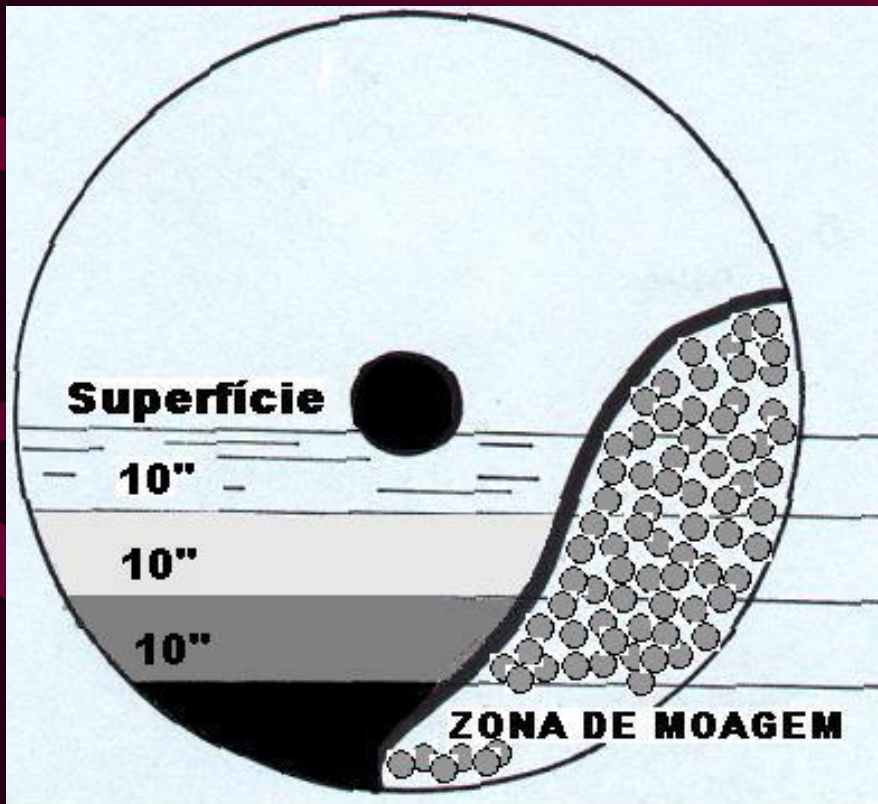
Moagem Seletiva

Maior seletividade de cominuição em favor das espécies de maior **gravidade específica**.



Moagem Seletiva

Distribuição Vertical de Partículas Caso Copperhill (Myers, J.F, 1957)

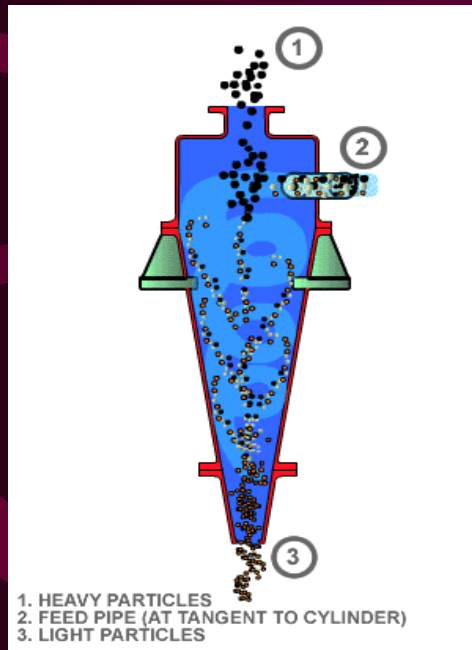


<u>Profundidade</u>	<u>% + 65 #</u>	<u>% - 200 #</u>	<u>% sólidos</u>
Superfície	6,5	51,7	46,2
10"	20,4	24,5	63,5
20"	28,1	19,3	70,9
30"	30,4	19,7	71,1
Fundo	-	-	~75,0



Seletividade no Hidrociclone

Finkie e Delboni (2004) estudam as variações produzidas no corte do **hidrociclone** (d_{50}) em função da densidade das espécies presentes, para minério de ferro (Hematita e Quartzo).



CLASSE	DENSIDADE, g/cc	d_{50} , μm
Hematita	4,83	40
100 - 75	4,56	50
75 - 50	4,02	77
25 - 0	2,94	105
Quartzo	2,67	138
GLOBAL	3,91	90



FUNDAMENTOS DO MODELO OPERACIONAL

1. Sistema Fenomenológico
2. Mecanismos Macroscópicos
3. Engenharia de Processos



Estrutura do Modelo Operacional

“*Scale-up*” do laboratório para as operações industriais



Racionalização de Circuitos Compostos



Otimização Operacional



1a Lei – Fenômeno Fundamental

Propriedade Macrofenomenológica



MODELOS ENERGÉTICOS

$$W = \frac{10 \text{ MJ}}{\sqrt{F80}} - \frac{10 \text{ MJ}}{\sqrt{F80}}, \text{ kWh/t}$$

MODELOS CINÉTICOS

S_1 , função seleção
 b_1 , função quebra

MODELO OPERACIONAL

$$IC = (BL/DM) TZ DI RM FG, (\text{Potência} - \text{hora})/t$$



Britagem

PROGRAMA “PROBRIT”

Análise de Fluxos

Dimensionamento de
Britadores

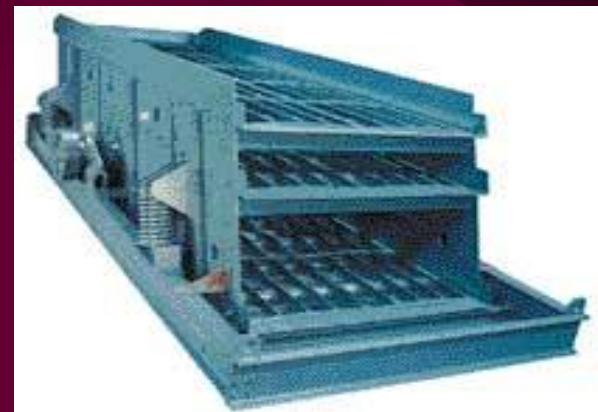
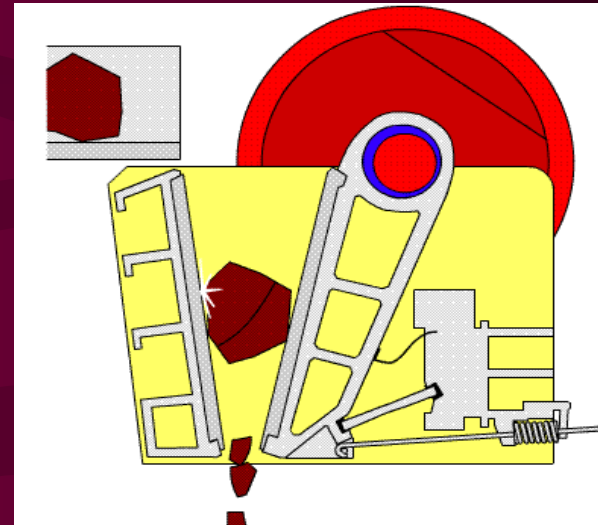
Cone Standard

Cone Short Head

Mandíbulas

Martelos

Dimensionamento de Peneiras
(1 a 3 decks)



INVESTIMENTOS

Equipamentos Principais, US\$ x 10³, 1987

EQUIPAMENTOS	CONVENCIONAL	OTIMIZADO
Transportadores de Correa	1.340	540
Alimentadores Vibratórios	350	235
Silos Intermediários	205	100
Peneiras	375	150
Motores Elétricos Britadores	230	230
Britadores	3.450	3.450
Coletores de Pó	310	310
TOTAL INVESTIMENTO	6.260	5.015



Moagem

$$R\Phi_0 \times IC \rightarrow G + M\Phi + F$$

Índice de Cominuição

$$IC = (BL/TM) \times TZ \times DI \times RM \times FG$$

(Potência – hora)/t

BL = ton. de Bolas

TM = ton/hora secas alimentadas

TZ = Tempo de Residência na Zona de Moagem

DI = Diâmetro Interno do Moinho

RM = Revoluções do Moinho por minuto

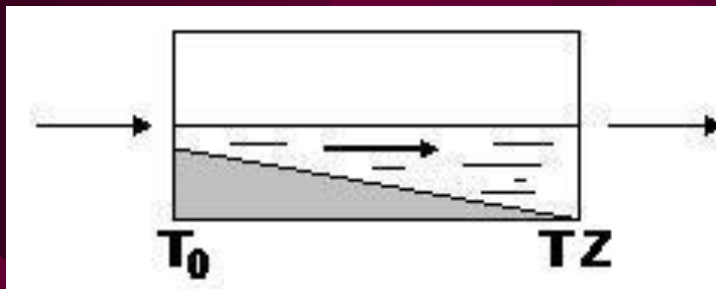
FG = Fator de Golpe x RPM = f(enchimento)



Teste Piloto

Os testes em batelada não possuem suficiente aplicação prática para a extrapolação industrial

- Tempo para atingir o Estado Estacionário (τ);
- Tempo de residência na zona de moagem (TZ);
- Tempo de residência da água (t);
- Enchimento otimizado, $JA = VZ$;
- Índice Base de Cominuição – IB.



Scale-Up Moagem



MODELOS ENERGÉTICOS

$$W' = W \cdot \frac{\pi \cdot E F_{i-1}}{i-1}, W = f(W_i, F80, P80)$$

MODELOS CINÉTICOS

$S_1 = S_1^* (P/H)$, sem limites de diâmetro
 S_1^* , independente do dimensionamento
 b_{11} , independente do dimensionamento
e da operação do moinho

MODELO OPERACIONAL

IB (base) = IC (industrial)
Para mesmos F80 e P80

PROGRAMA “PROMILL”

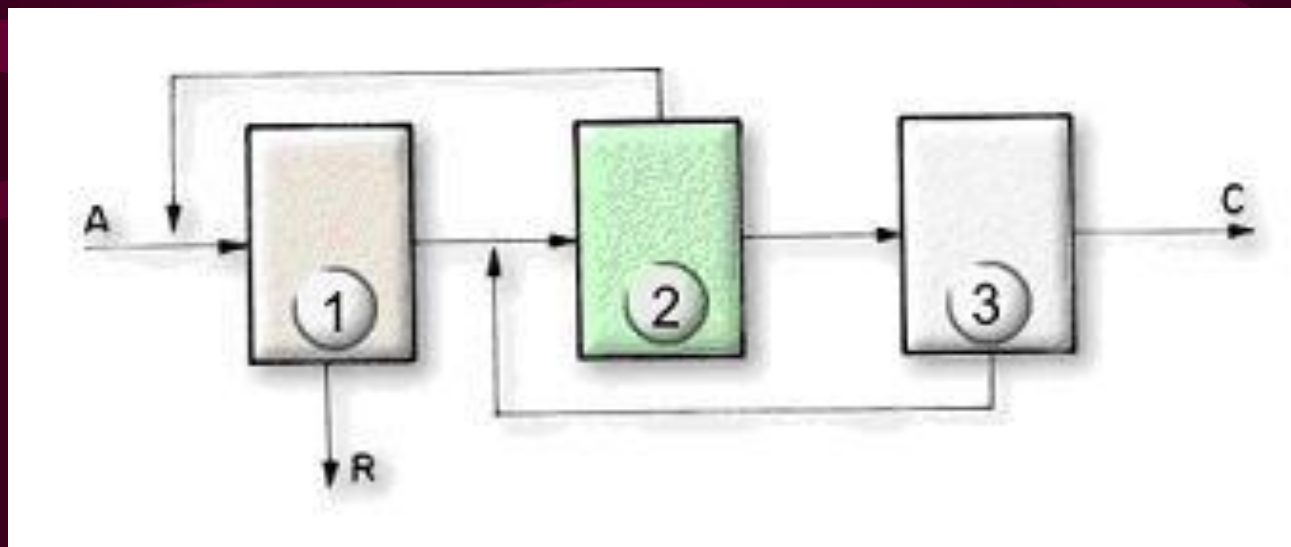
- Dimensionamento de Moinhos Tubulares (a úmido)
- Avaliação de Utilização de Moinho de Dimensões Conhecidas



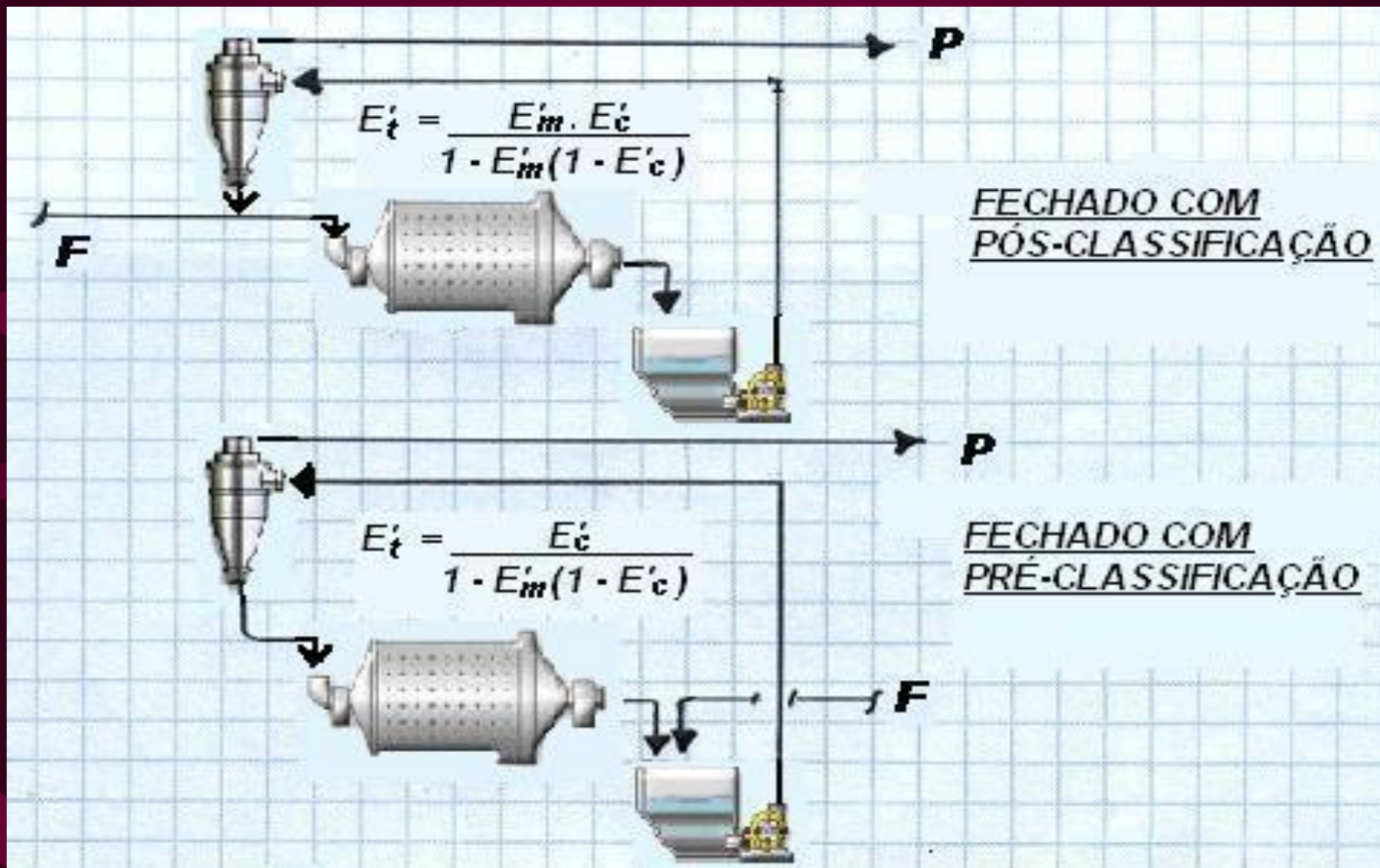
2a Lei – Equação de Continuidade

O processo se descreve em função de todas as suas etapas

$$E = f(E_1, E_2, E_3, \dots, E_n)$$



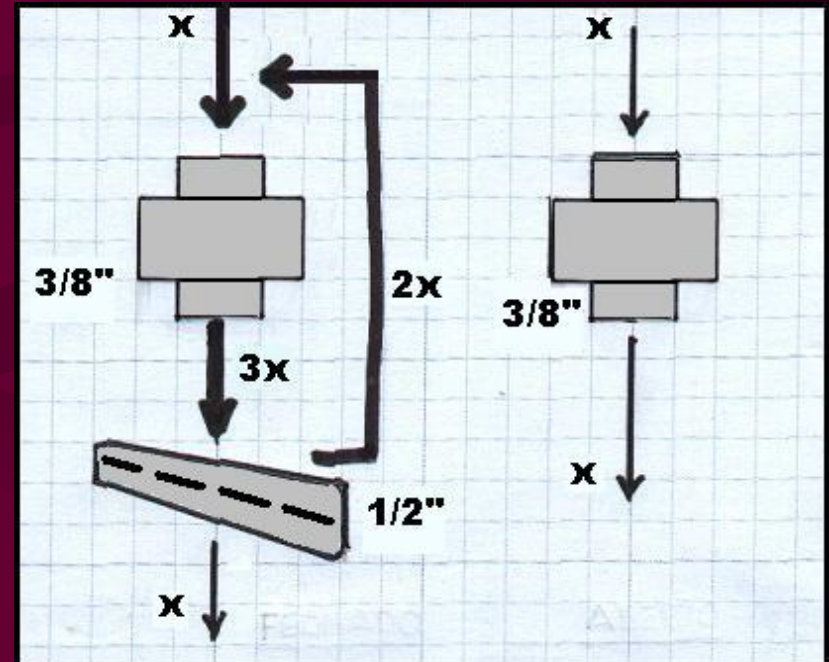
Moagem: circuito fechado



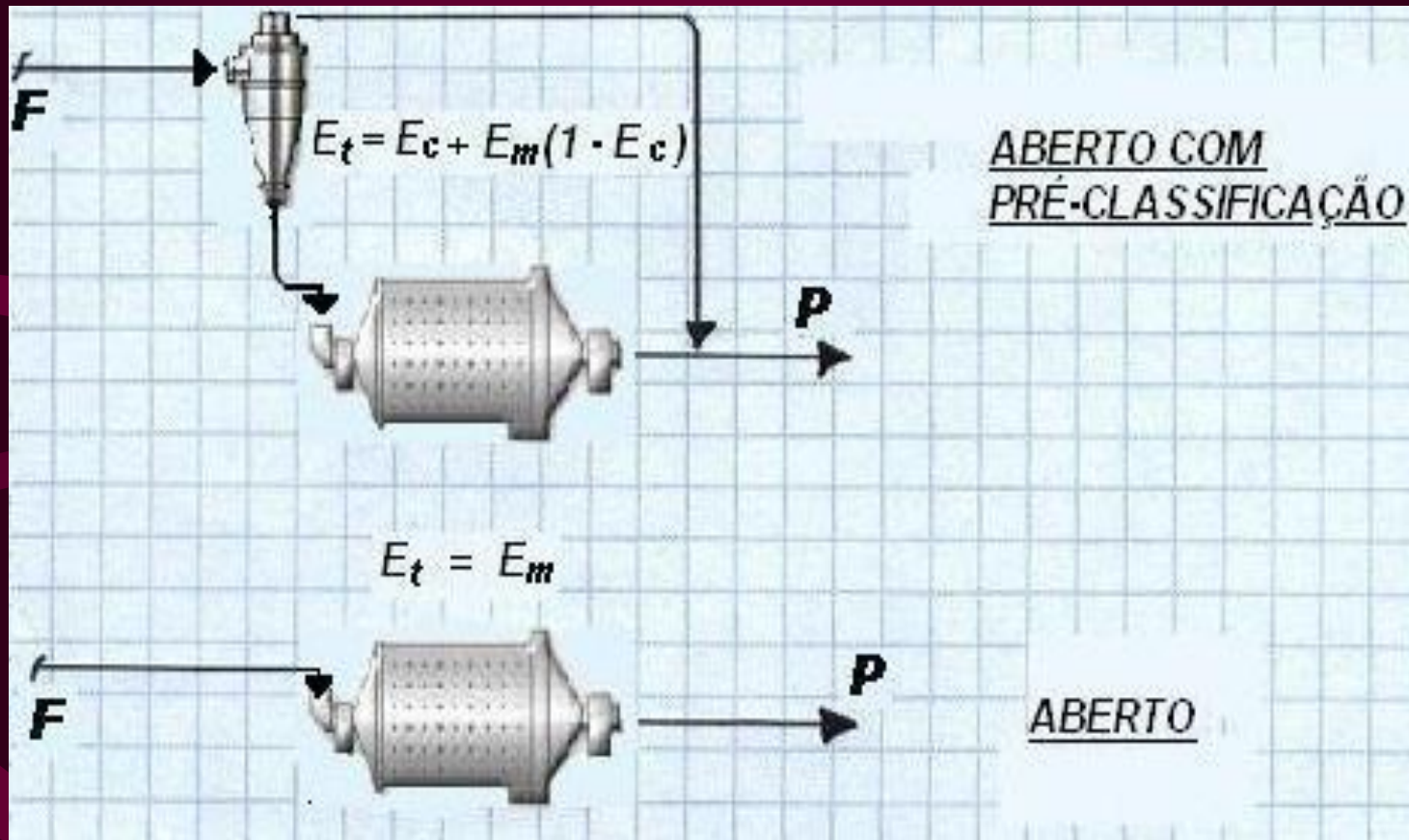
Britagem: circuito aberto

Eliminando as cargas circulantes da britagem é possível reduzir em quase 30% os investimentos e também os **custos de operação**, além de diversos benefícios metalúrgicos.

É esperado um **aumento geral de capacidade** da usina.



Moagem: circuito aberto

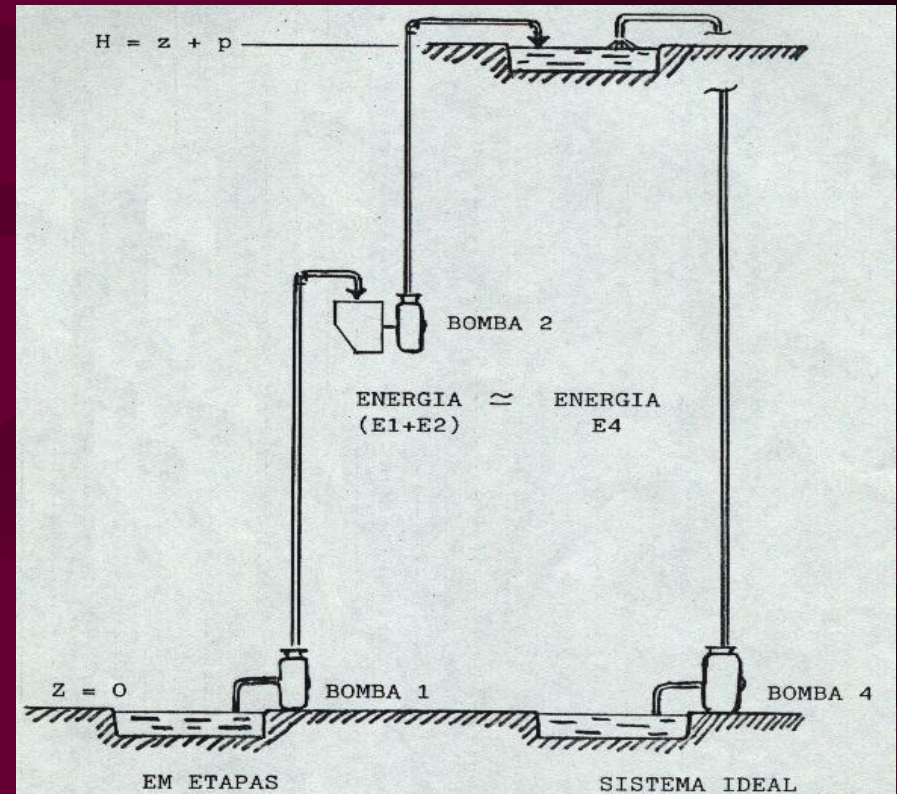
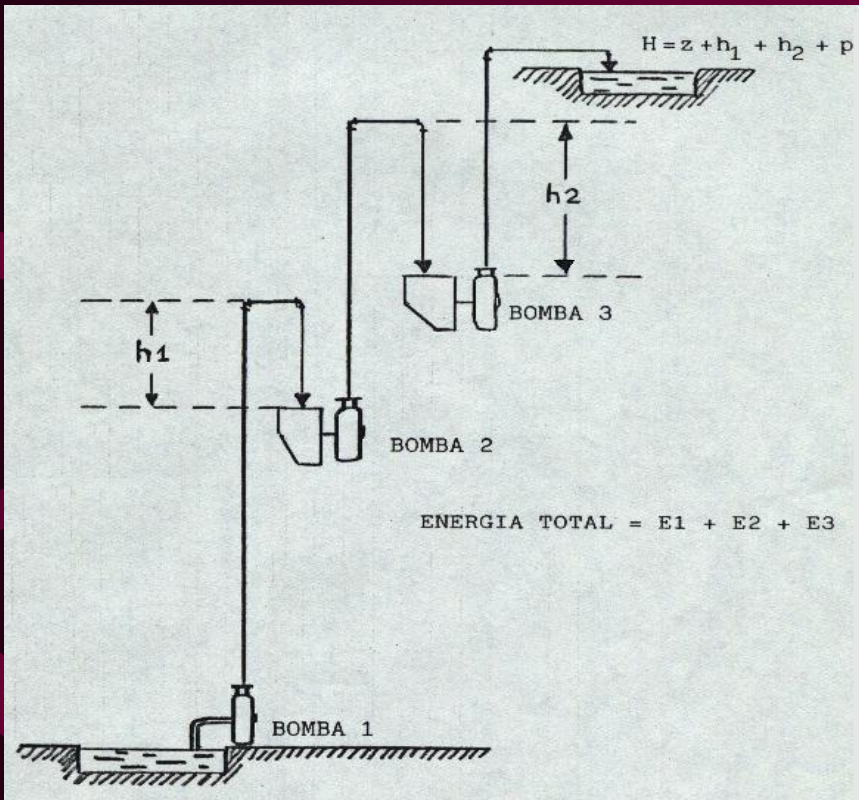


3a Lei – Equação de Otimização

Otimização dos Processos baseada em “atuações operacionais”, que levam o fenômeno real até condições próximas da potencialidade natural.



Exemplo: Transporte Otimizado

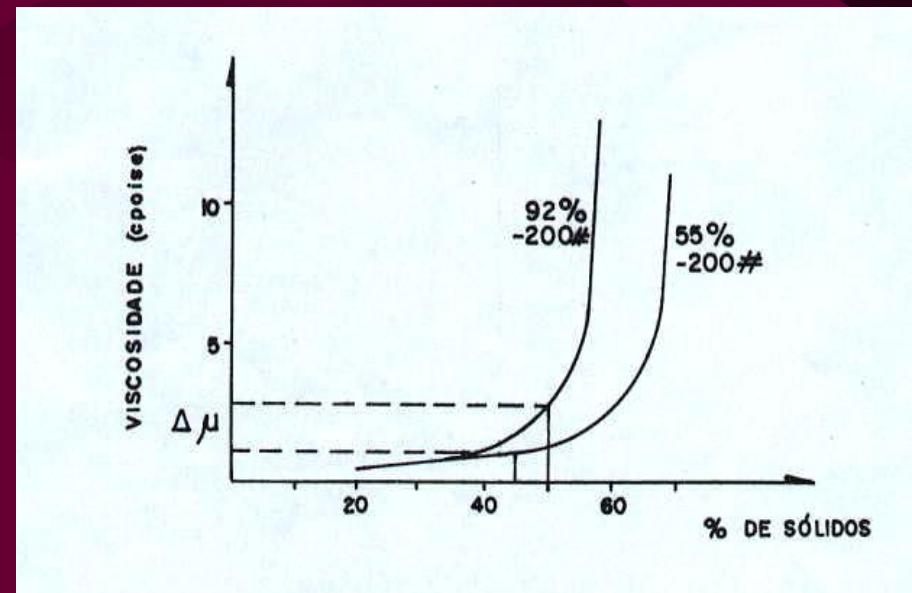


Estudo Reológico da Polpa



Os mecanismos principais da operação de Moagem dependem diretamente da **viscosidade** da polpa.

A viscosidade depende da gravidade específica do minério e da densidade, granulometria e temperatura da polpa.



Estudo de Corpos Moedores

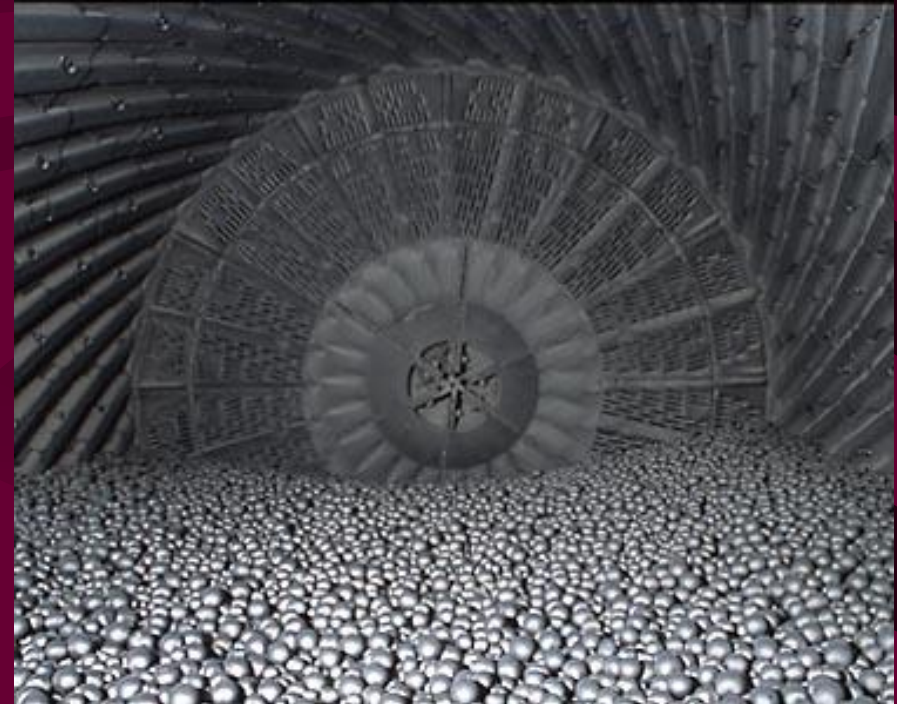
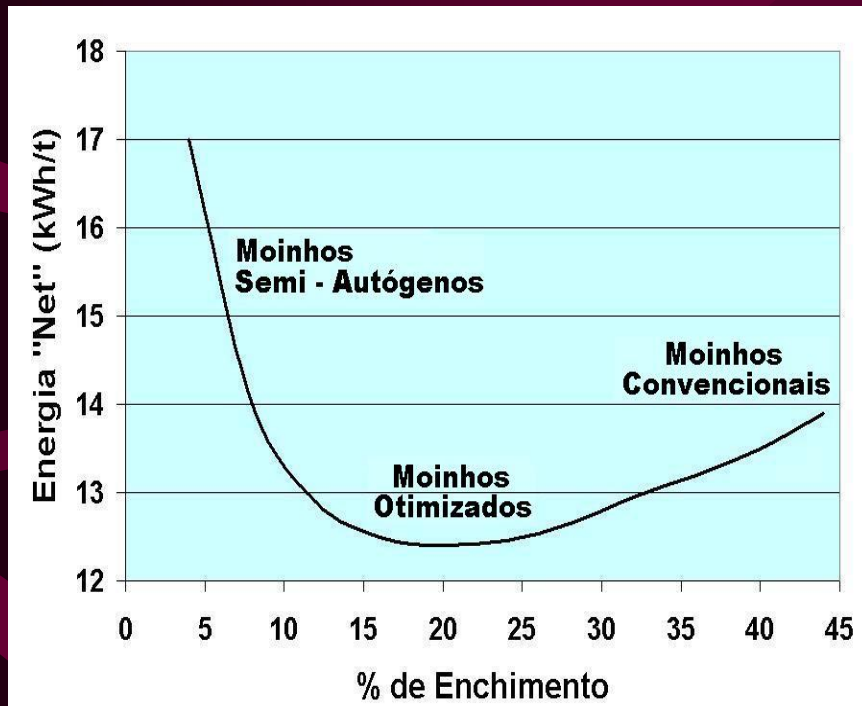


Bolas menores significam uma maior frequência das *colisões* com a rocha, porém de menor intensidade (ΔE).

A carga moedora vá, com o tempo, adquirindo exatamente o perfil de equilíbrio para o processo, na sua distribuição de tamanhos.



Nível Ótimo de Enchimento

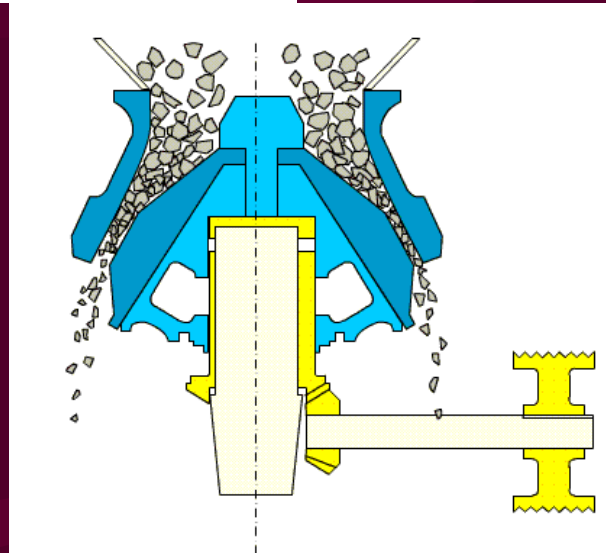
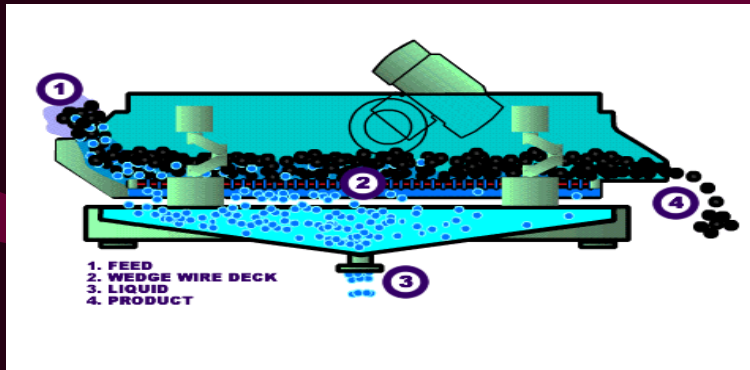


Sistema de Controle Operacional

- **Novas Telas de Controle**
- **Rotinas de Ajuste e Controle Energético**
 - Software de Ajuste Balanço Energético
- **Implantação de Sistema de Controle Operacional**



Britagem



PROGRAMA “OPERABRIT”

Telas de Controle

Balanço Massas

Controle Granulométrico

Ajuste de Britadores



Moagem

Mínimo consumo de energia para produzir o IC requerido



OPERAMILL.OPT

- Diagnóstico de Moinhos em Operação
- Otimização Estacionária de Moinho em Operação
- Operação Virtual de Moinhos (14 variáveis manipuladas)



Projeto de Moagem

Alternativas de Moagem Projeto Cobre, Brasil

Item	Convencional	Otimizado
Nº Moinhos	6	7
Dimensões	16,5' x 31,3'	16,5' x 30,2'
Consumo Específico, kWh/ton	16,89	14,73
Enchimento de Bolas, % Vol	40	22,1
Carga Circulante, %	350	“Zero”
Investimento, US\$ x 10 ³	37.730	36.130
Custo de Operação, US\$/ton	1,88	1,50
Custo de Produção, US\$/ton	2,39	1,99



Moagem Minério de Cobre

Copperhill, Moinho de Bolas 7' x 10' (EEUU)

Item	Aberto	Fechado
Carga de Bolas, tons	35	55
Nível de Enchimento, % Vol	29%	45%
Produção, ton/dia	2.250	2.130
Potencia Aplicada, HP	370	490
Consumo de Bolas, lb/ton	0,84	1,02
Moagem Sulfetos – 200#	65%	62%
Moagem Ganga – 200#	35%	40%
Rejeito Flotação, % Cu	0,068	0,08
Coletor, lb/ton	0,28	0,34



Moagem Minério de Ferro

Kirkenes, Moinho de Bolas 21' x 32' (Noruega)

Item	Aberto	Fechado (Outros moinhos da Usina)
Nível de Enchimento, % Vol	22 %	35 – 40 %
Produto – 208 micras	82,4 %	80%
Consumo de Bolas, g/ton	653	759
Consumo de Liners, g/ton	44	66
Consumo Específico, kWh/ton	7,9	10,22

