

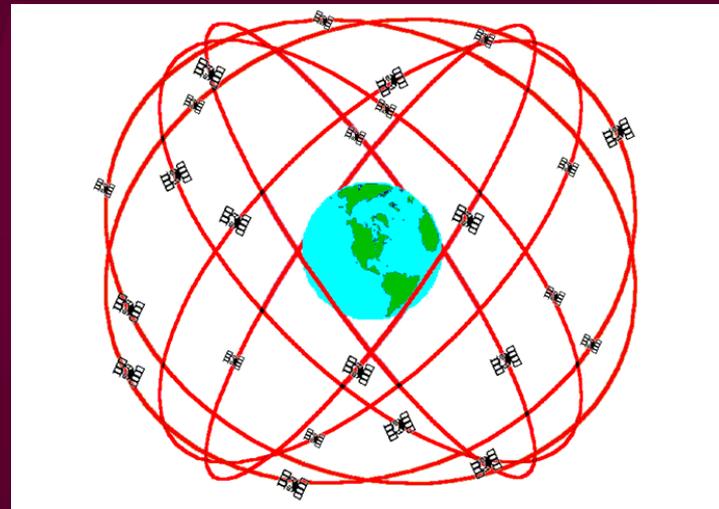
OTIMIZAÇÃO E CONTROLE PROCESSOS DE MOAGEM

Alexis P. Yovanovic
Novembro 2006



FUNDAMENTOS DO MODELO OPERACIONAL

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



1. SISTEMA FENOMENOLÓGICO

- Fenômeno Fundamental
- Transferência de Massa
- Recuperação do Produto

Transferência de Massa

FASE 1 → **INTERFASE** → **FASE 2**

Fenômeno Fundamental

Recuperação do Produto

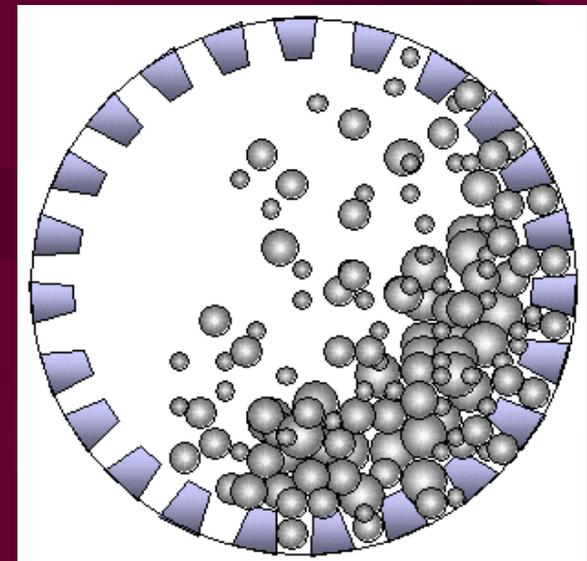
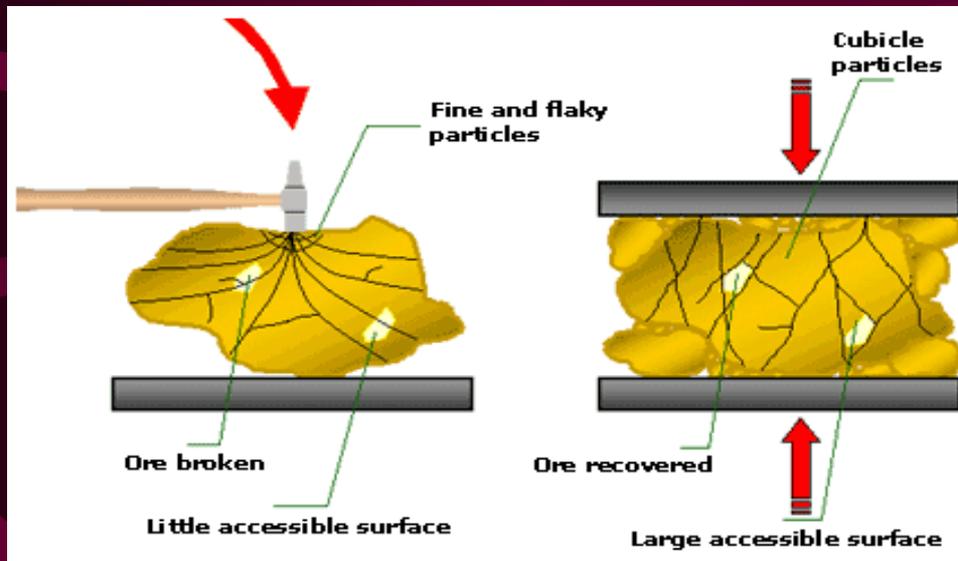
ALIMENTAÇÃO

PRODUTO



Fenômeno Fundamental

Quebra e Desagregação



Quebra

O Modelo Operacional assume que a rocha se comporta como uma dissolução em fase sólida de substâncias de interesse, dentro de uma solução de ganga.

O grão é unidade 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

O grau de liberação da partícula de interesse deve ser avaliada por faixa granulométrica, de acordo com o **Índice de Liberação (Φ)**.

$\Phi = (\text{Peso da substância livre} / \text{Peso total de substância}) \times 100$, para cada faixa.

Na medida em que o minério é moído, as fraturas ocorrem mais rapidamente ao longo das bordas dos grãos, de modo que os minérios são primeiro reduzidos até tamanhos próximos ao tamanho natural do grão.



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

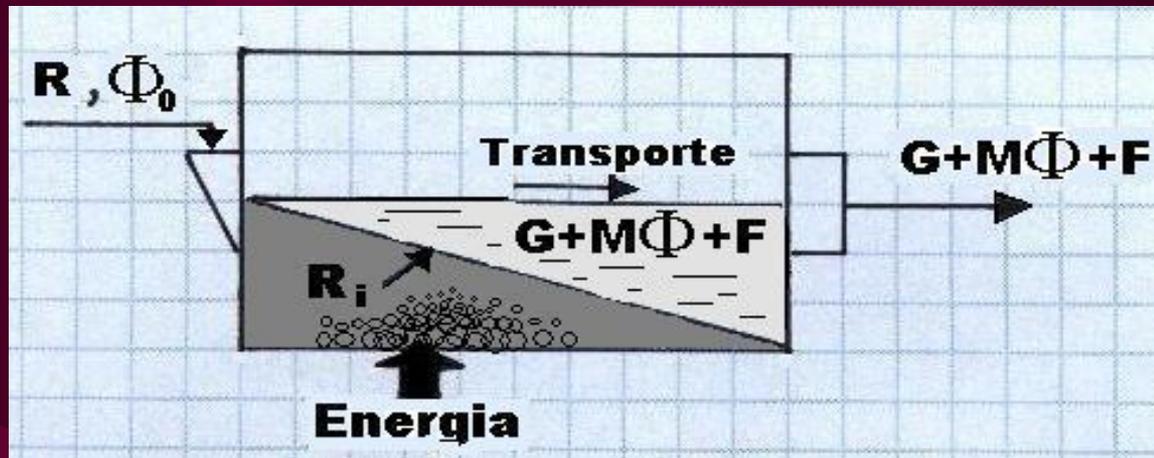
Equação de Transferência

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

$N_x = \text{Coef. de Transf.} \times \text{Área de Contato} \times \text{Gradiente}$

$$N_x, \text{ t/h} = K \times A \times \Delta E$$

- **Transporte de Quant. de Movimento**

Lei de Newton, da viscosidade $\tau = -\mu \, dA/dx$

- **Transporte de Energia (Calor)**

Lei de Fourier $Q = m \, c_p \, \Delta t$ $\Delta t = (T_2 - T_1)$

- **Transporte Molecular de Massa**

Lei de Ficks, da difusão $D = f(\Delta C)$; $\Delta C = (C_2 - C_1)$



Transferência de Massa

Gradiente e Forças Impulsoras

Moagem:

$$N_x = t/h = K \times A \times \Delta E = K_t \times A_t \times (\Phi - \Phi_0)$$

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

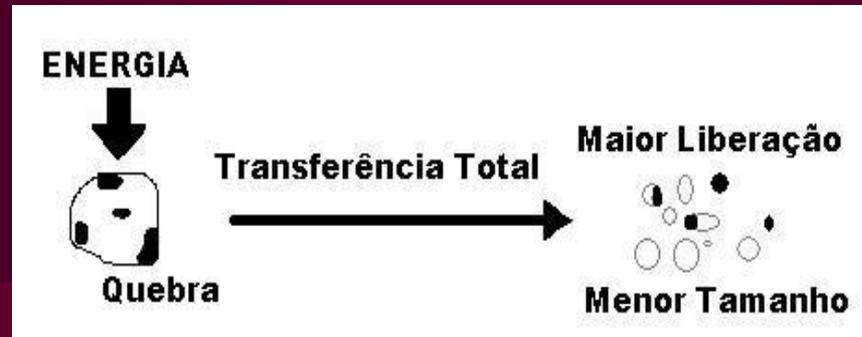


**FENÔMENO NATURAL +
OPERAÇÃO (Rec. Do Produto)
= FENÔMENO REAL**



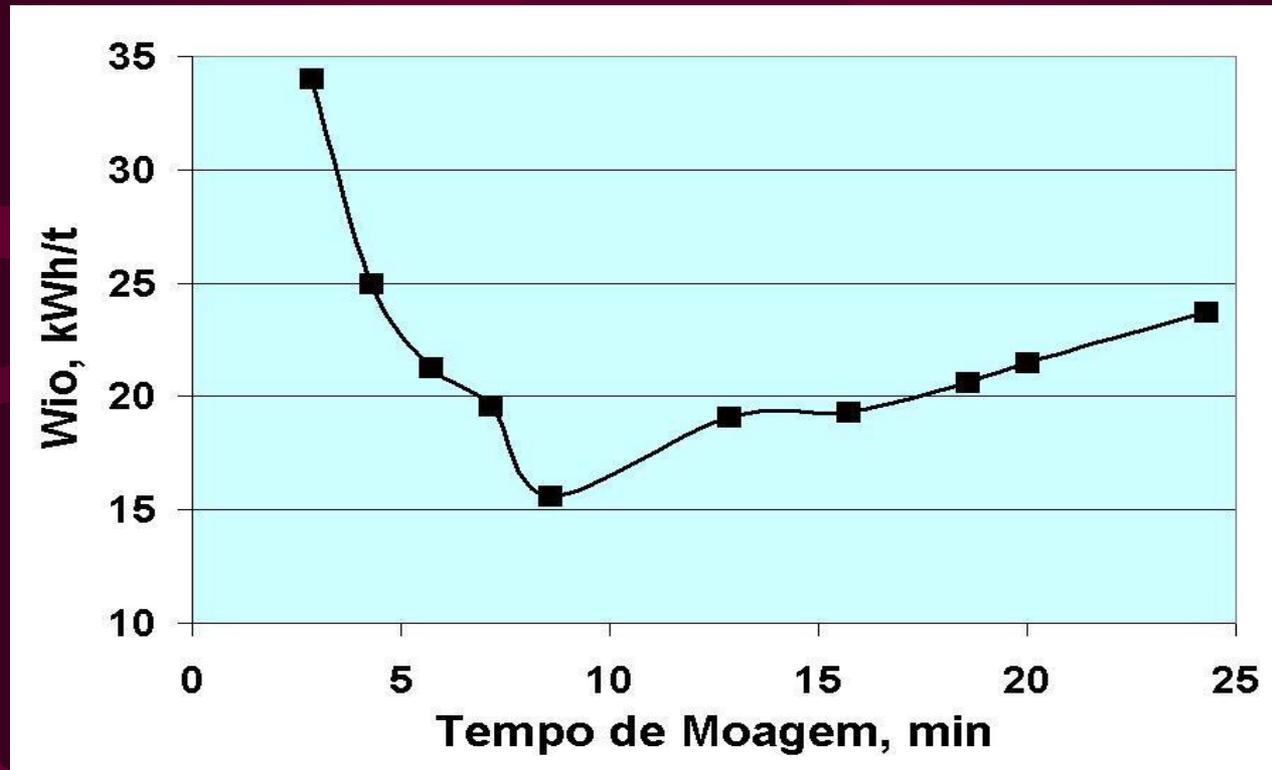
Recuperação do Produto

Cominuição – recuperação total de massa



Função Transporte

Moagem em Batelada



FUNDAMENTOS DO MODELO OPERACIONAL

1. Sistema Fenomenológico

2. Mecanismos Macroscópicos

3. Engenharia de Processos



2. MECANISMOS MACROSCÓPICOS

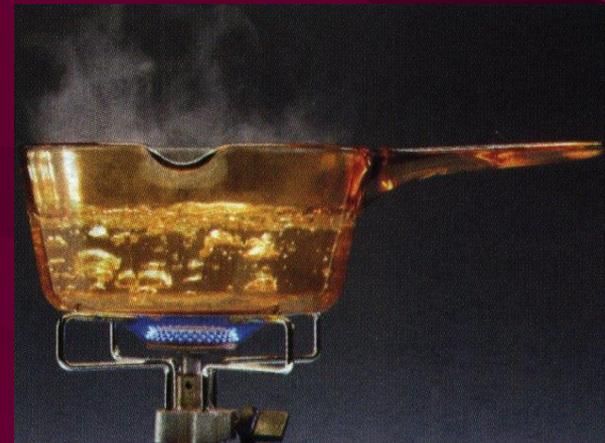
Parâmetros Quantificáveis:

- Aplicação de Energia
- Cinética
- Seletividade



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)

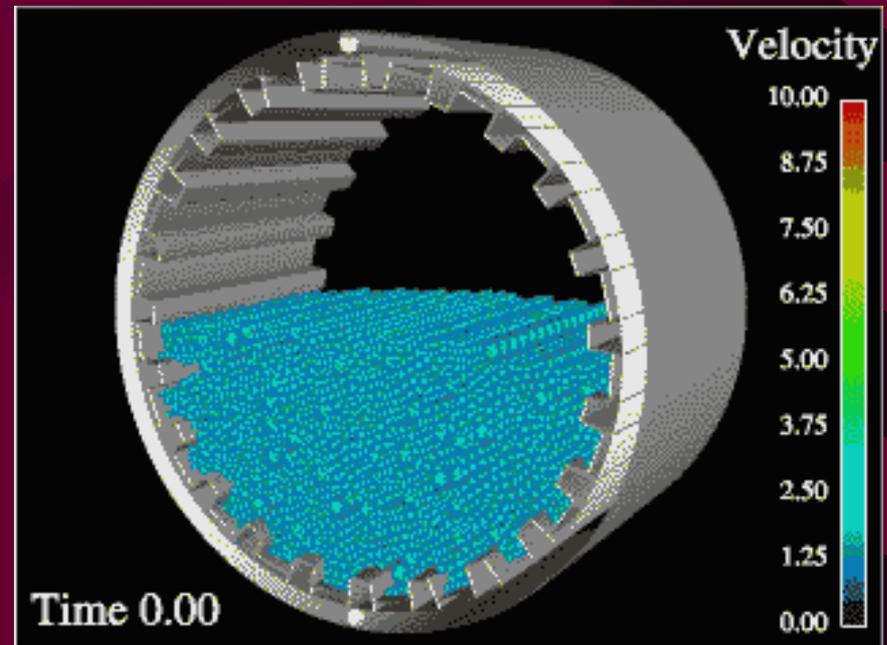
Textura da Andesita	Wi, kWh/st
Grossa	12,82
Media	14,35
Fina	15,24

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



Energia na Moagem

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



Princípios Energéticos do Modelo Operacional

1. A partícula gerada de uma partícula heterogênea é uma nova partícula diferente
2. Energia Mecânica Aplicada = f (contatos massivos bola/minério)
3. A quantidade massiva de contatos x força é *constante* para atingir um determinado objetivo
4. Existe uma combinação ótima de contatos x força que proporciona o menor custo energético

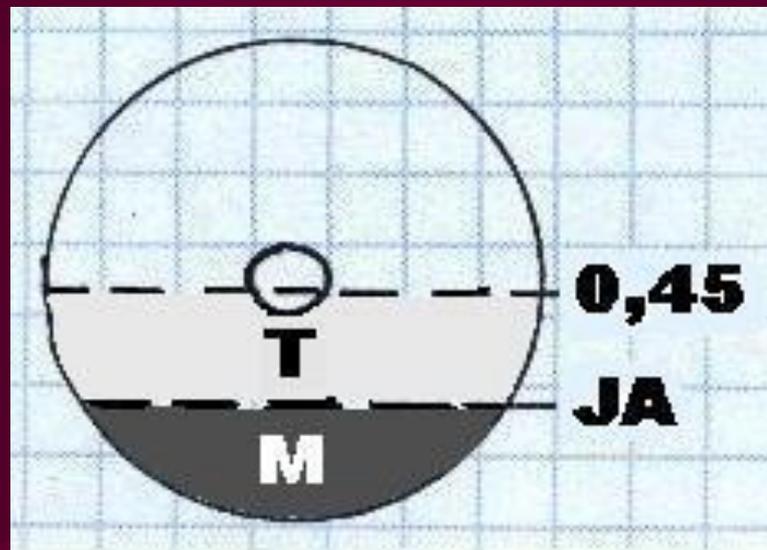


Aplicação Mecânica da Energia

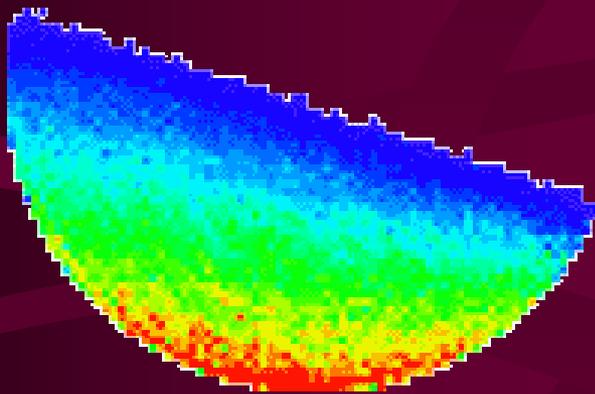
Densidade da carga

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

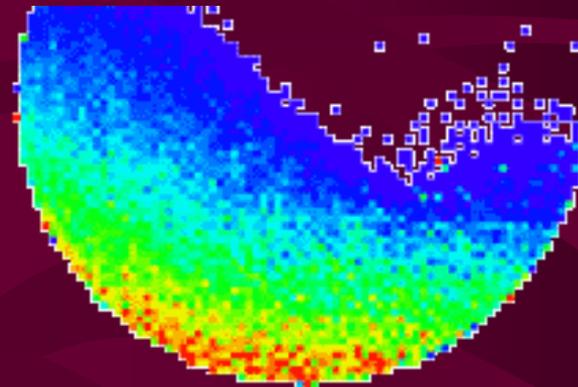
$$HP = f(L, DI, FV, DC) \quad , \quad HP \text{ gross}$$



Energia e Velocidade de Rotação



60 – 65% VC



70 – 75% VC

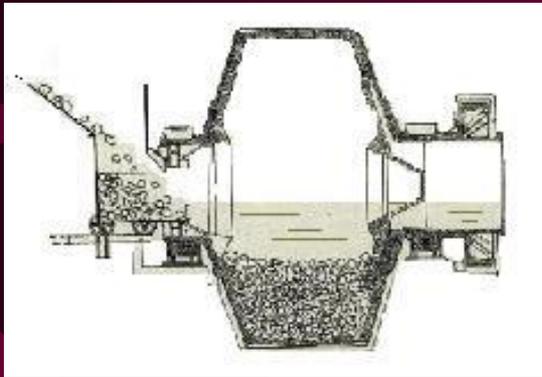
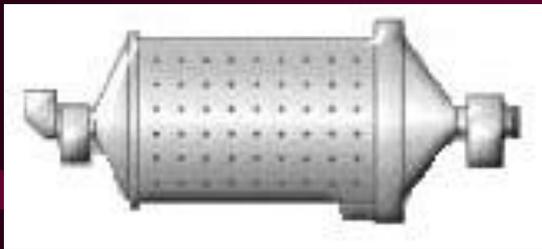


Racionalização Energética

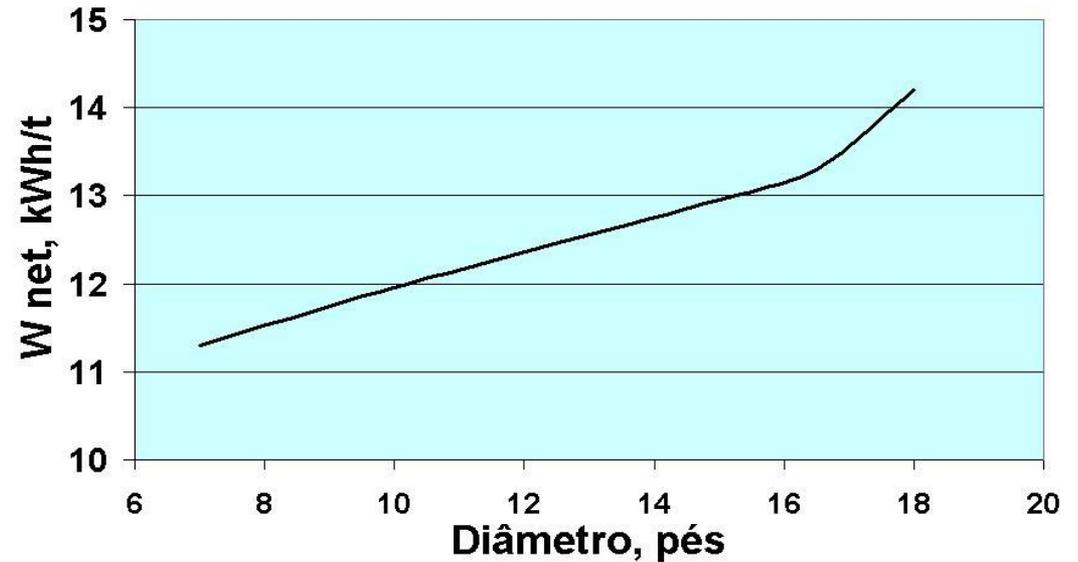
- Diâmetro Ótimo do Moinho
- Nível Otimizado de Enchimento
- Velocidade Ótima de Rotação
- Circuito Aberto



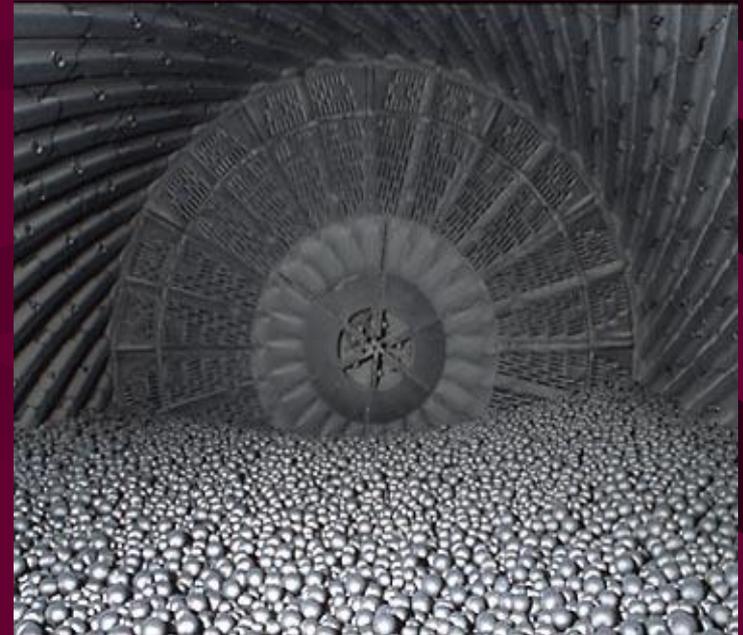
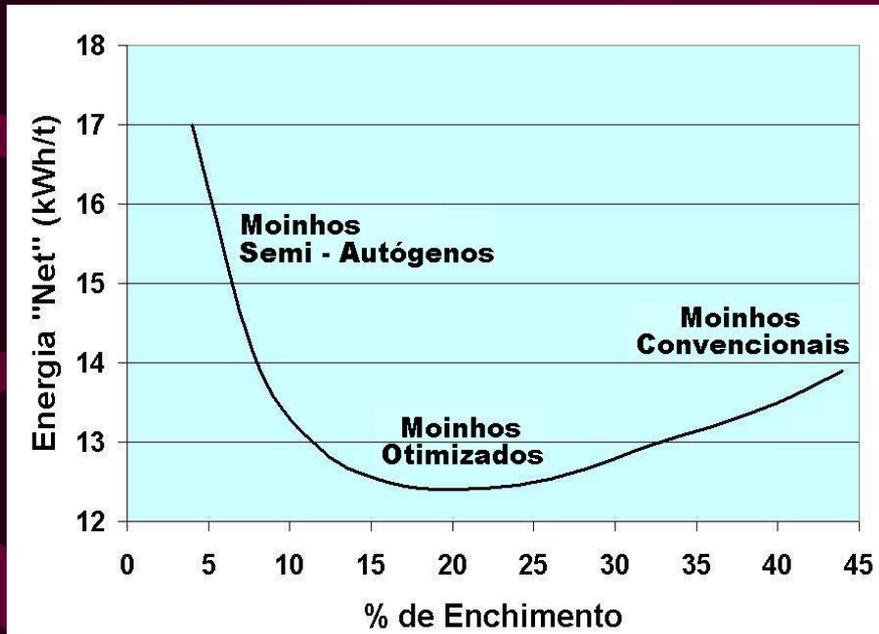
O Diâmetro do Moinho



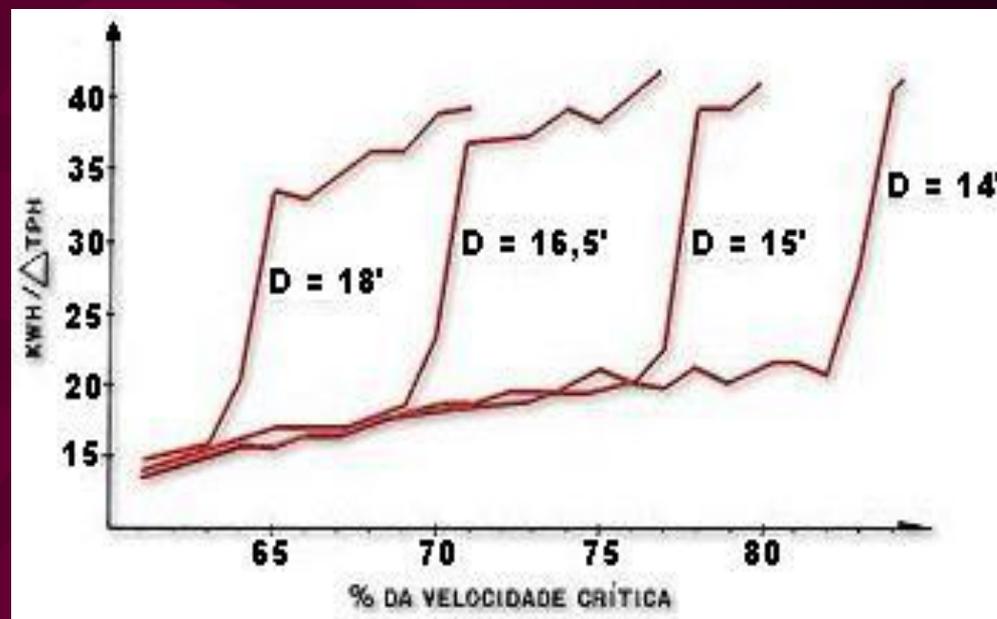
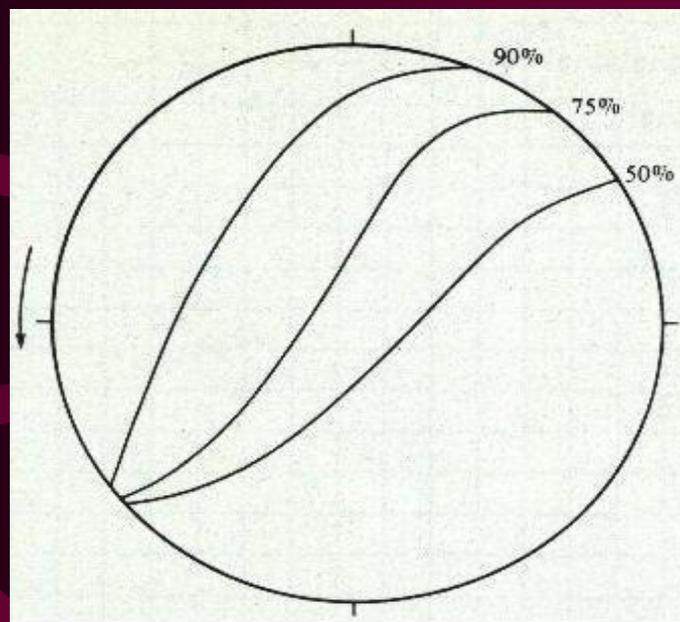
$W_i = 15,18$; $F_{80} = 14.438$ micras
 $P_{80} = 149$ micras; $SG = 3,15$; $NE = 38\%$



Nível de Enchimento



Velocidade de Rotação



Cinética do Processo

O primeiro objetivo da avaliação cinética é o estudo da velocidade de ocorrência do evento estudado e os fatores que a afetam, estabelecendo uma relação cinética entre os processos descontínuos e contínuos.

O segundo objetivo é utilizar os dados de velocidade para dimensionar o equipamento de contato e a taxa de produção.

* (Modelos Cinéticos de Simulação)



Velocidade da Reação de Moagem

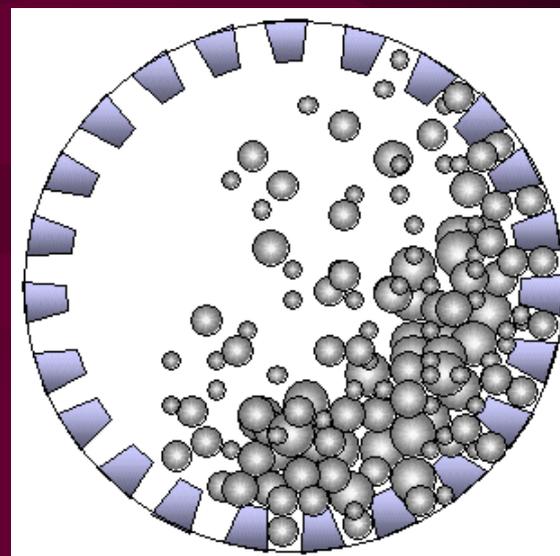
Colisão entre os corpos moedores e as partículas.

Intensidade



nível de energia aplicada

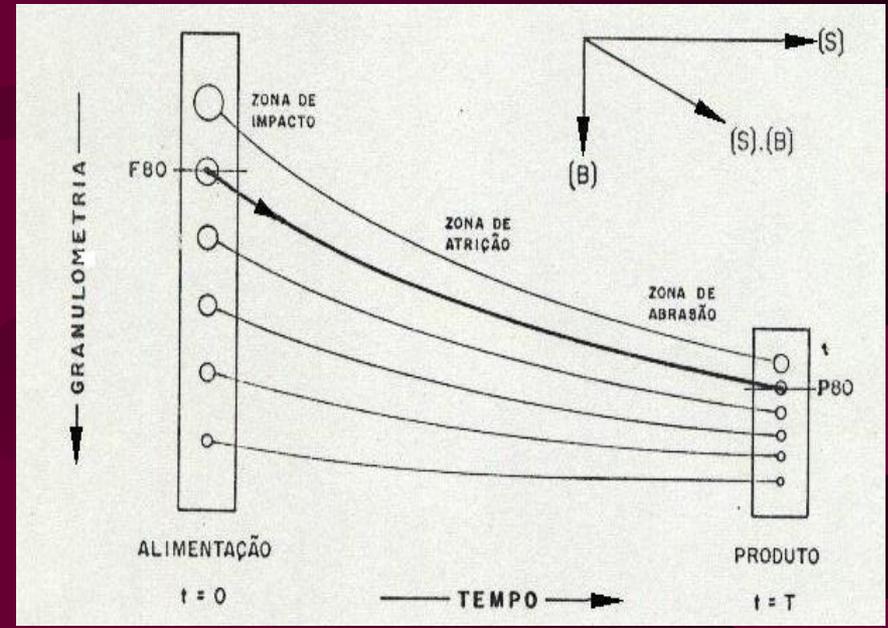
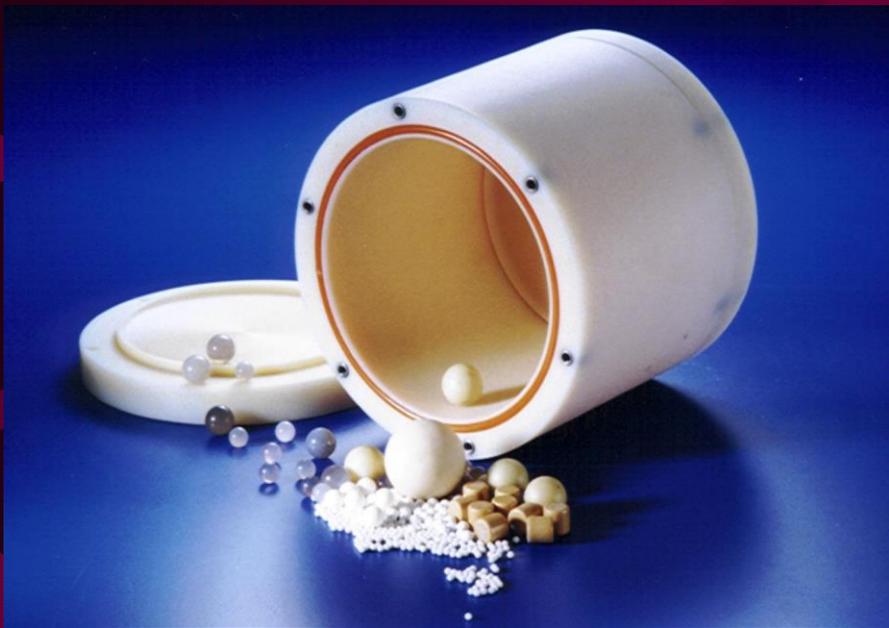
Frequência



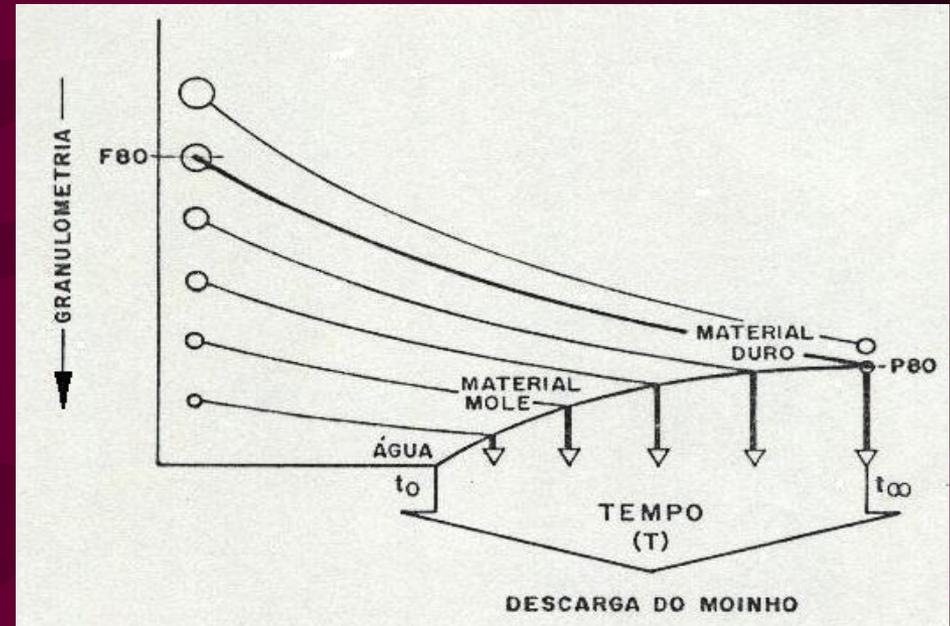
colisões por unidade de tempo



Processo por Batelada



Processo Contínuo



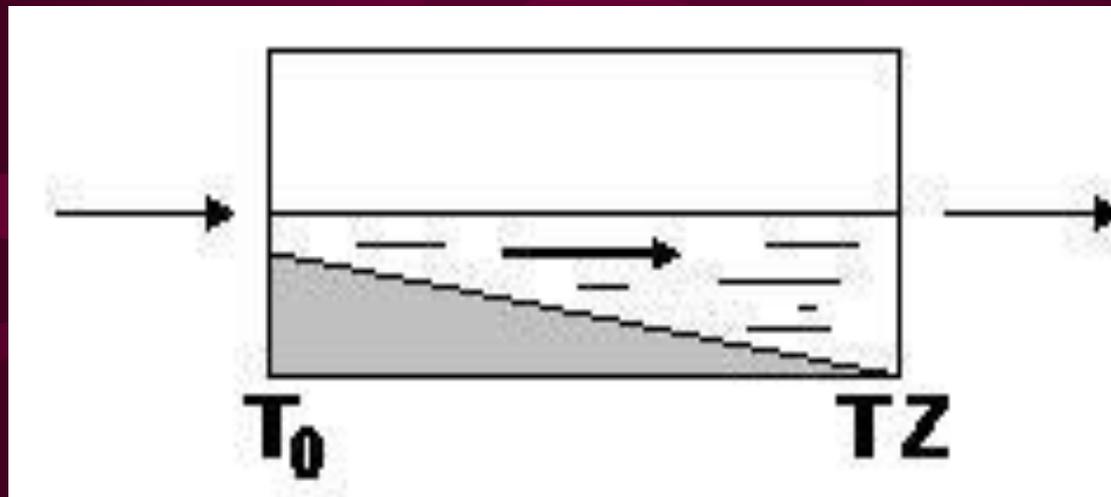
O moinho contínuo produz diferente distribuição granulométrica que o moinho de batelada.



Função Transporte

$\tau \rightarrow t$ (Água)

$\tau \rightarrow TZ$ (Rocha)



A retirada oportuna do produto, mediante certa velocidade e seletividade, permite utilizar a energia com mais eficiência sobre as partículas que precisam ser cominuidas.



Função Transporte

Na Função Transporte (retirada de produto), num circuito contínuo, a água e os finos possuem um tempo de residência (t) entre 10 a 13 minutos, dependendo do processo e da densidade da polpa alimentada.

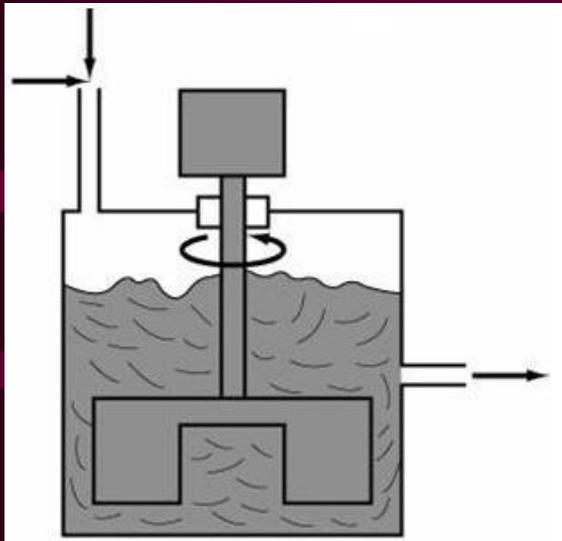


Função Transporte

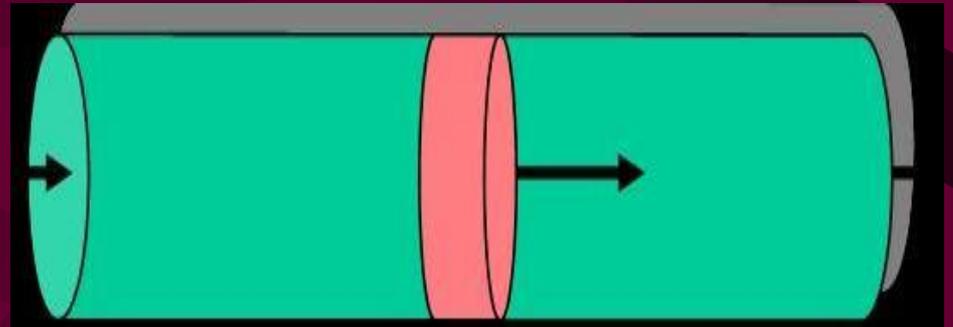
Na fase rocha (zona de moagem), os tempos de residência obtidos (TZ) são bastante superiores, pelo aumento da densidade da carga afundada, e atinge valores que podem mudar entre 30 a 40 minutos, dependendo da gravidade específica do material e do nível de enchimento de corpos moedores



Equipamentos Contínuos de Contato



BACKMIX



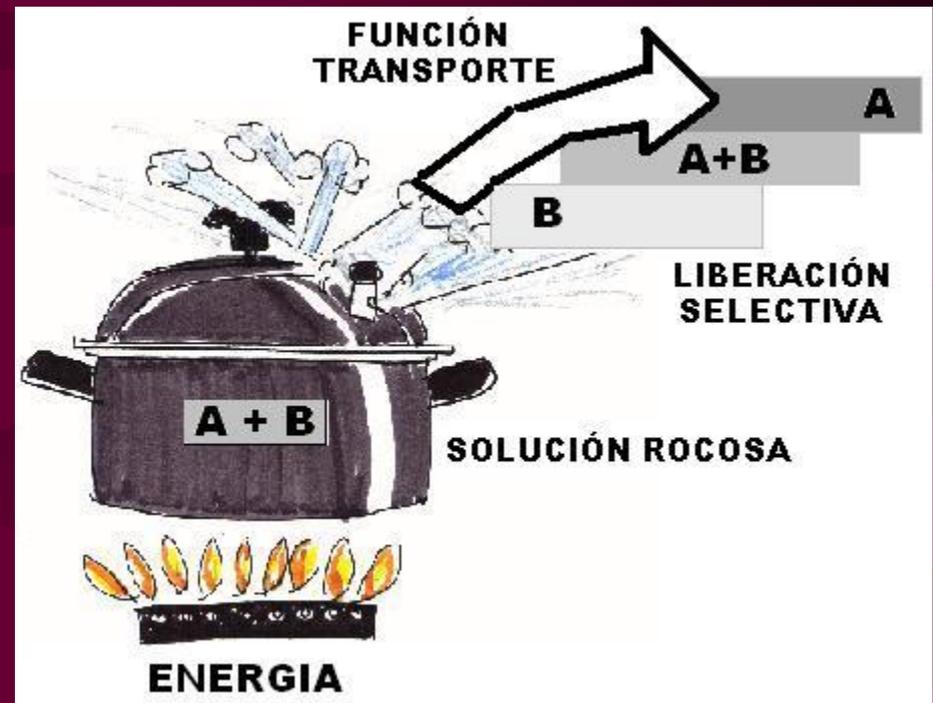
TUBULAR (PLUG-FLOW)



Seletividade

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

Os minérios “macios” precisam de menor energia para atingir o grau de liberação desejado.



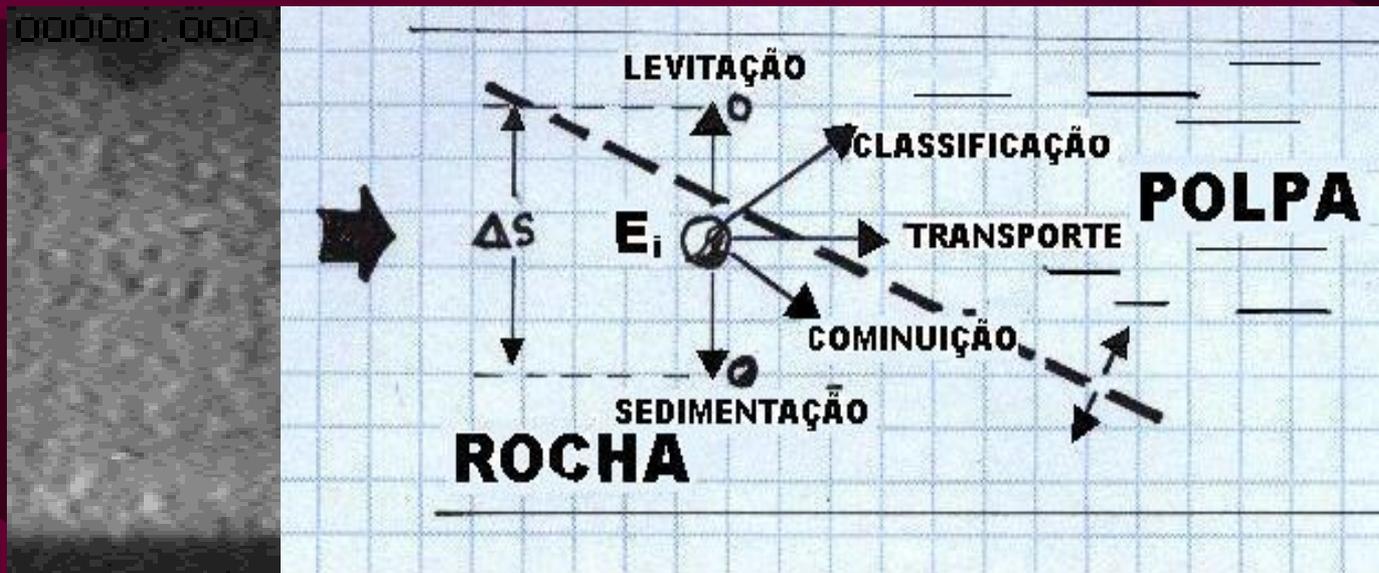
Operação Seletiva

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



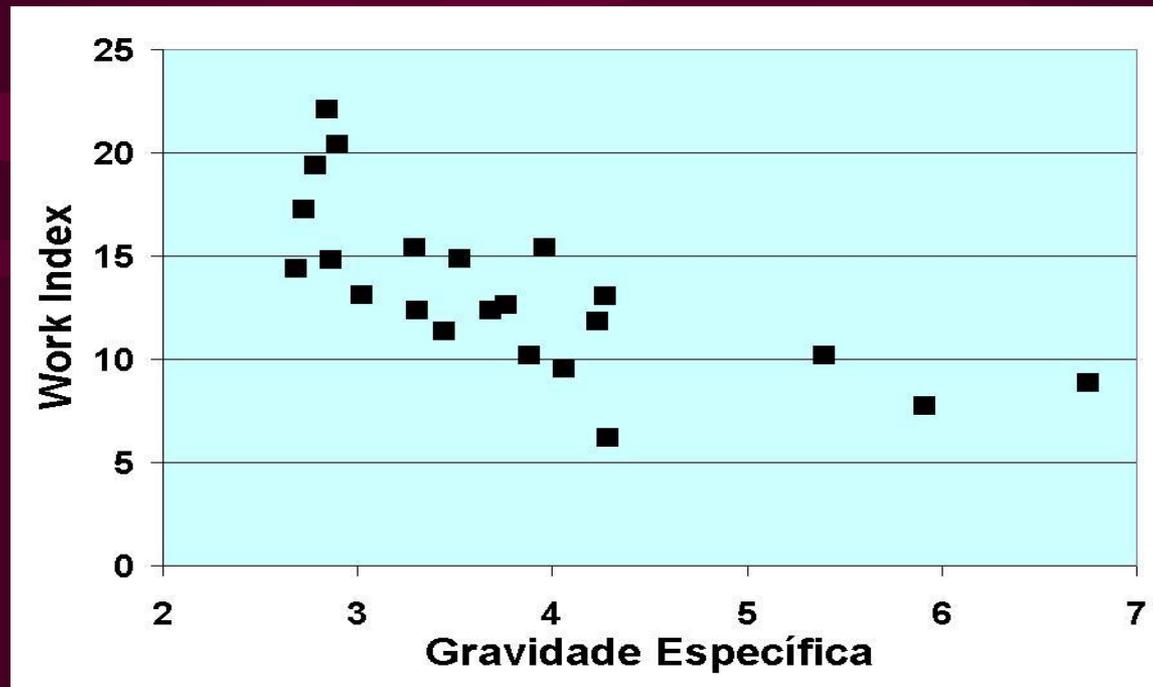
Moagem Seletiva

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***).



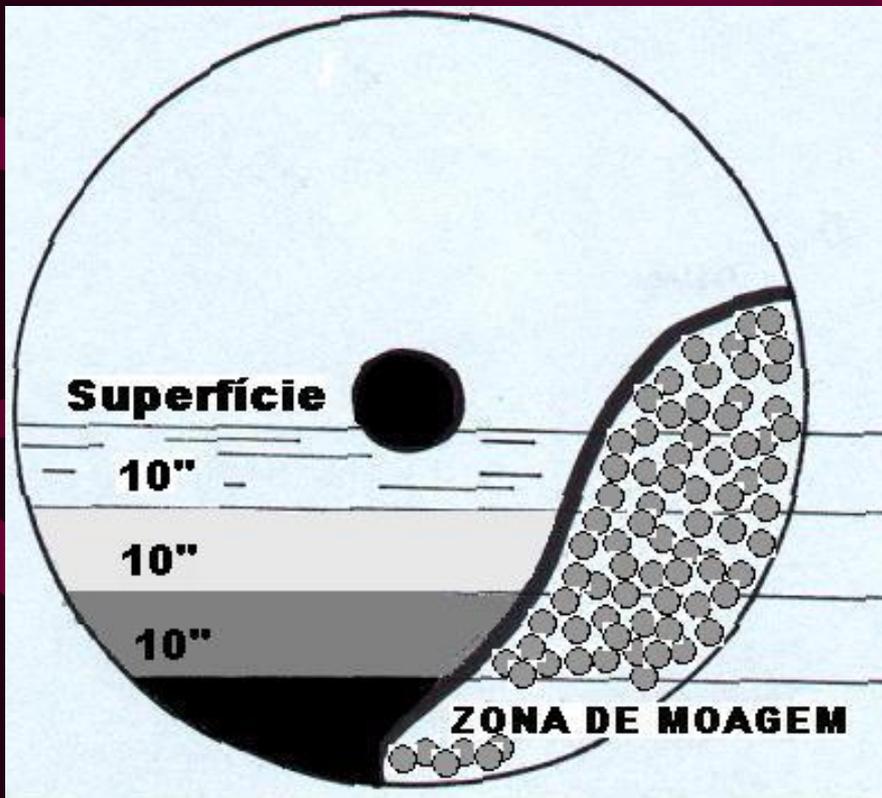
Moagem Seletiva

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



Moagem Seletiva

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

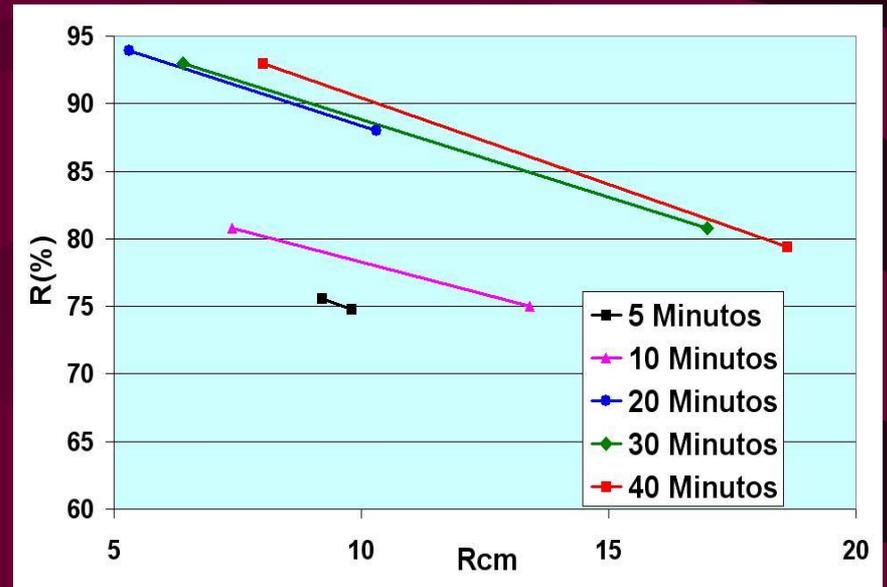
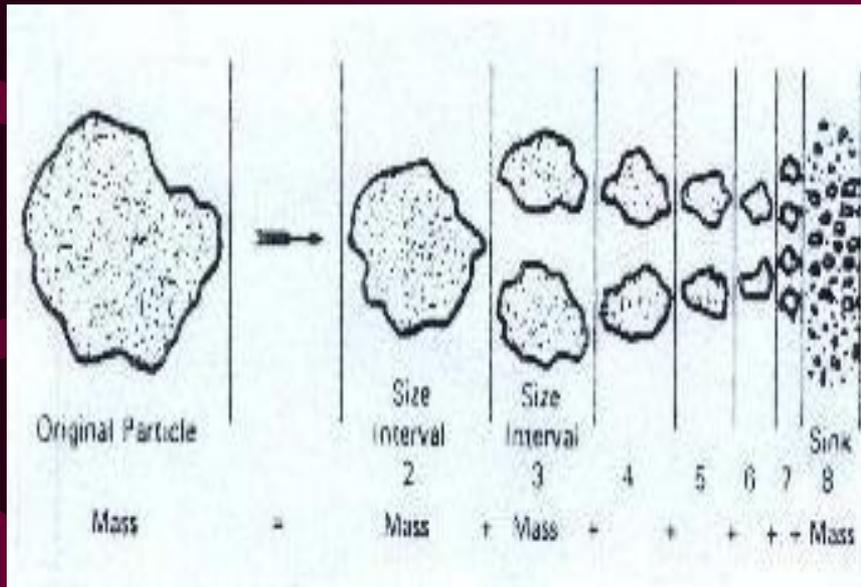


<u>Profundidade</u>	<u>% + 65 #</u>	<u>% - 200 #</u>	<u>% sólidos</u>
Superfície	6,5	51,7	46,2
10"	20,4	24,5	63,5
20"	28,1	19,3	70,9
30"	30,4	19,7	71,1
Fundo	-	-	~75,0



Grau de Moagem e Liberação

Seletividade na Flotação



FUNDAMENTOS DO MODELO OPERACIONAL

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



3. ENGENHARIA DE PROCESSOS

1ª Lei: Fenômeno Fundamental

Propriedade macrofenomenológica, e "*scale-up*" para as operações industriais.

2ª Lei: Equação de Continuidade

A descrição do processo, no estado estacionário, é feita a partir de equações de continuidade, considerando todas as etapas envolvidas.

3ª Lei: Equação de Otimização

A otimização dos processos é baseada em atuações operacionais, que levam o fenômeno real até condições próximas de sua potencialidade natural.



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

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



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

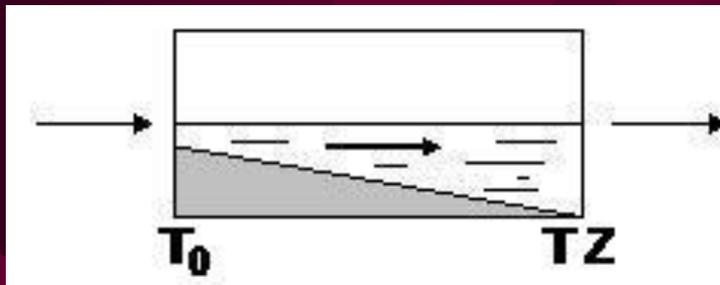
FG = Fator de Golpe x RPM = f(enchimento)



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

$$W' = W \times \frac{\pi}{1} \frac{E F}{1}, W = f(W_i, F80, P80)$$

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



Scale-Up Moagem

$$E, \Phi = f(\text{IC})$$

Cada material precisa de um determinado IC, para uma condição tamanho/liberação, e o valor experimental é o mesmo na escala industrial, ambos em continuidade:

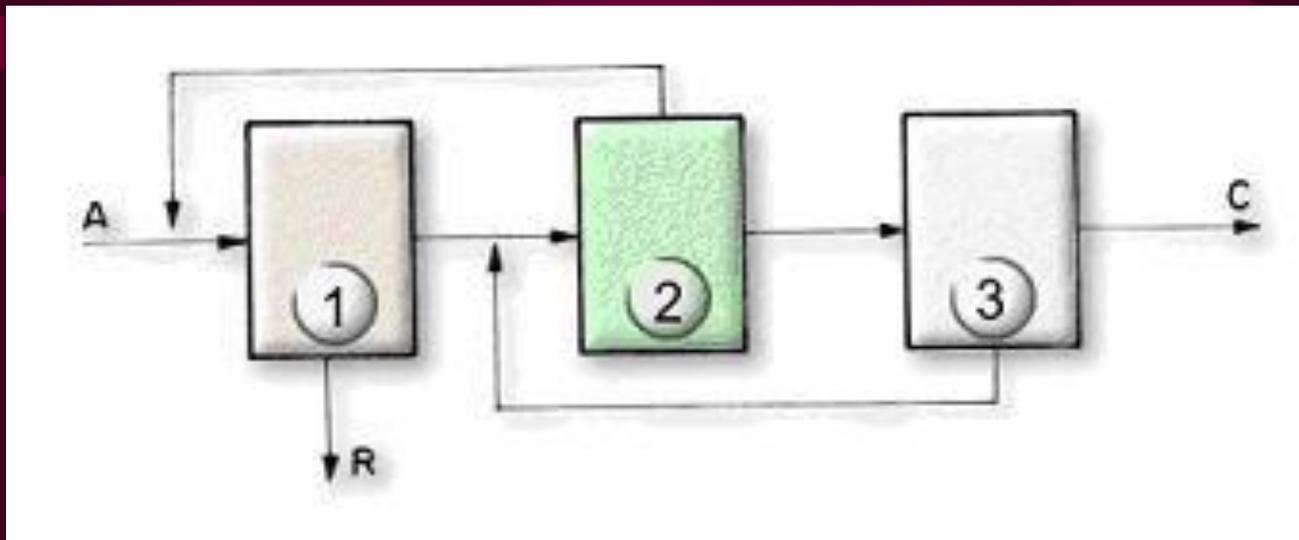
$$\text{IB} = \text{IC}, \text{Primeira Lei}$$



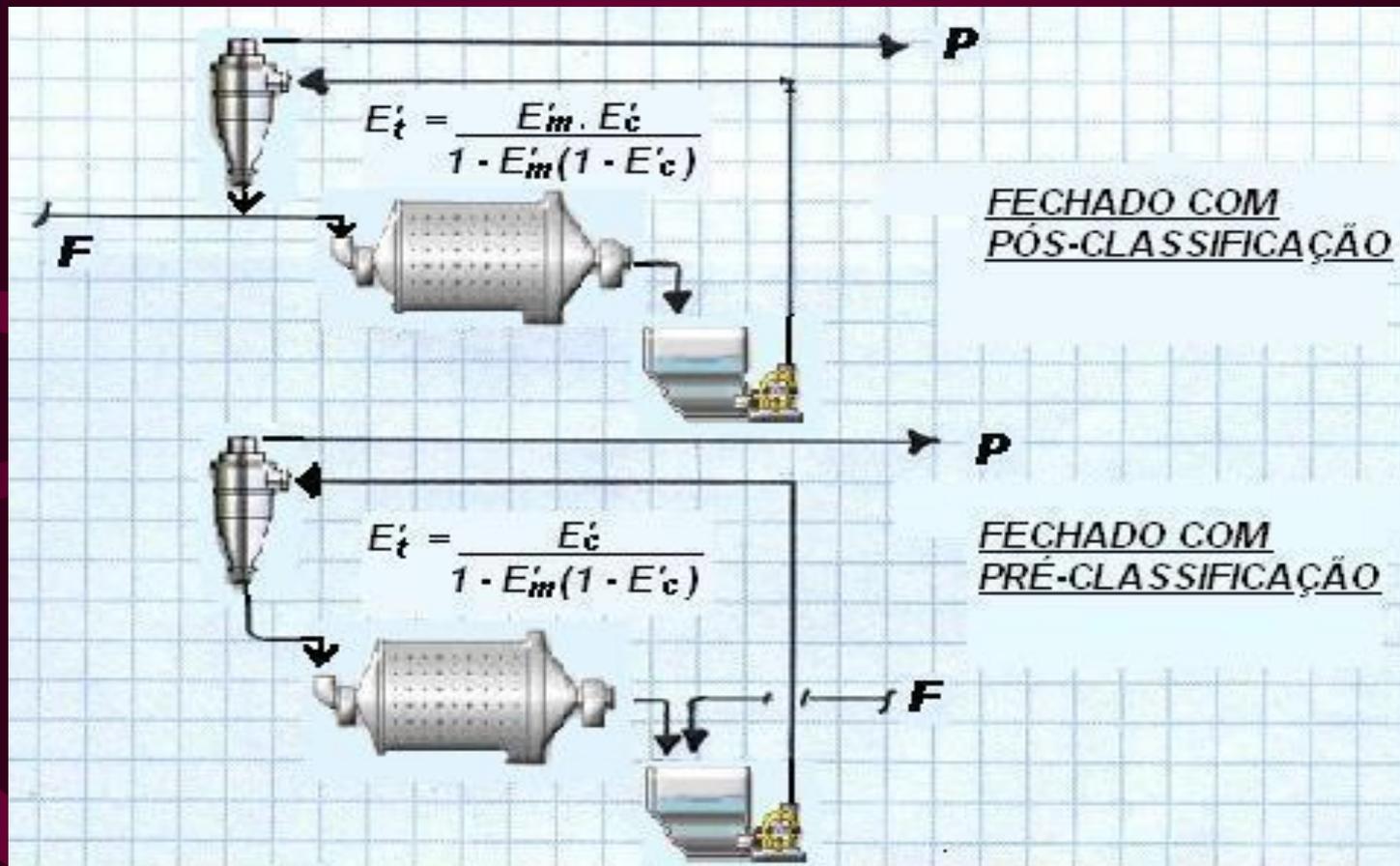
2a Lei – Equação de Continuidade

O processo se descreve em função de todas as suas etapas

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

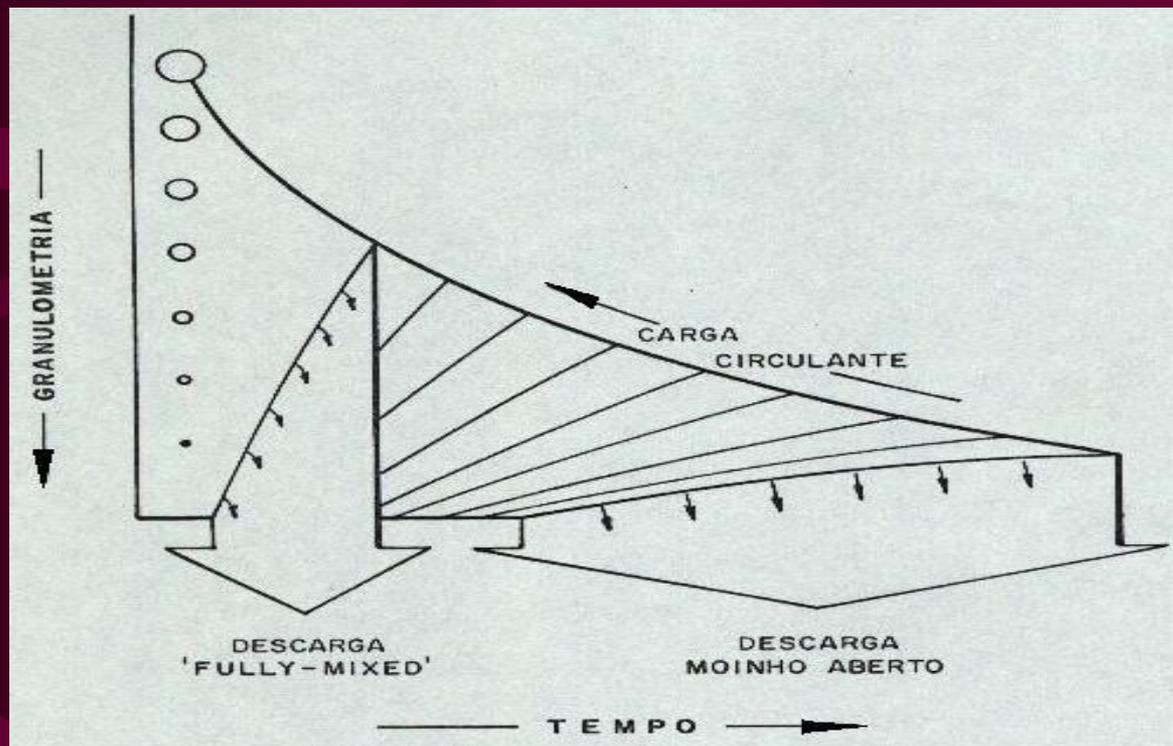


Moagem: circuito fechado



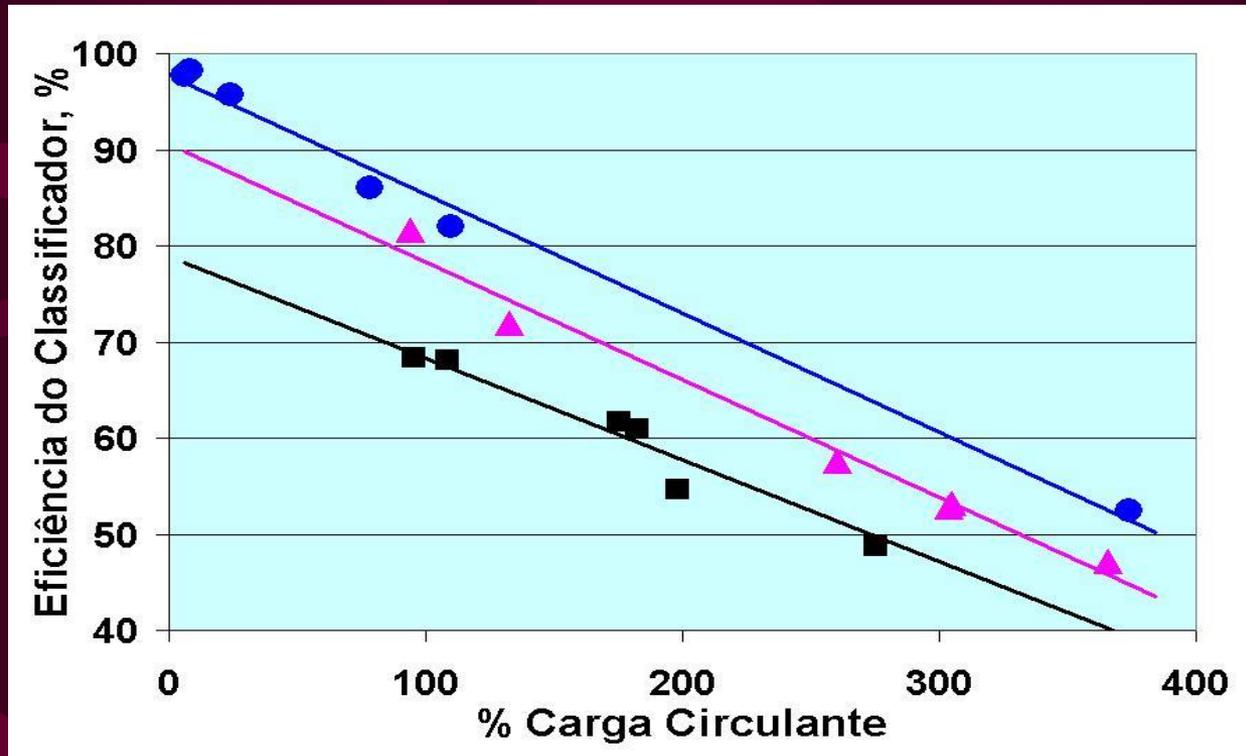
Moagem: circuito fechado

Classificação Externa

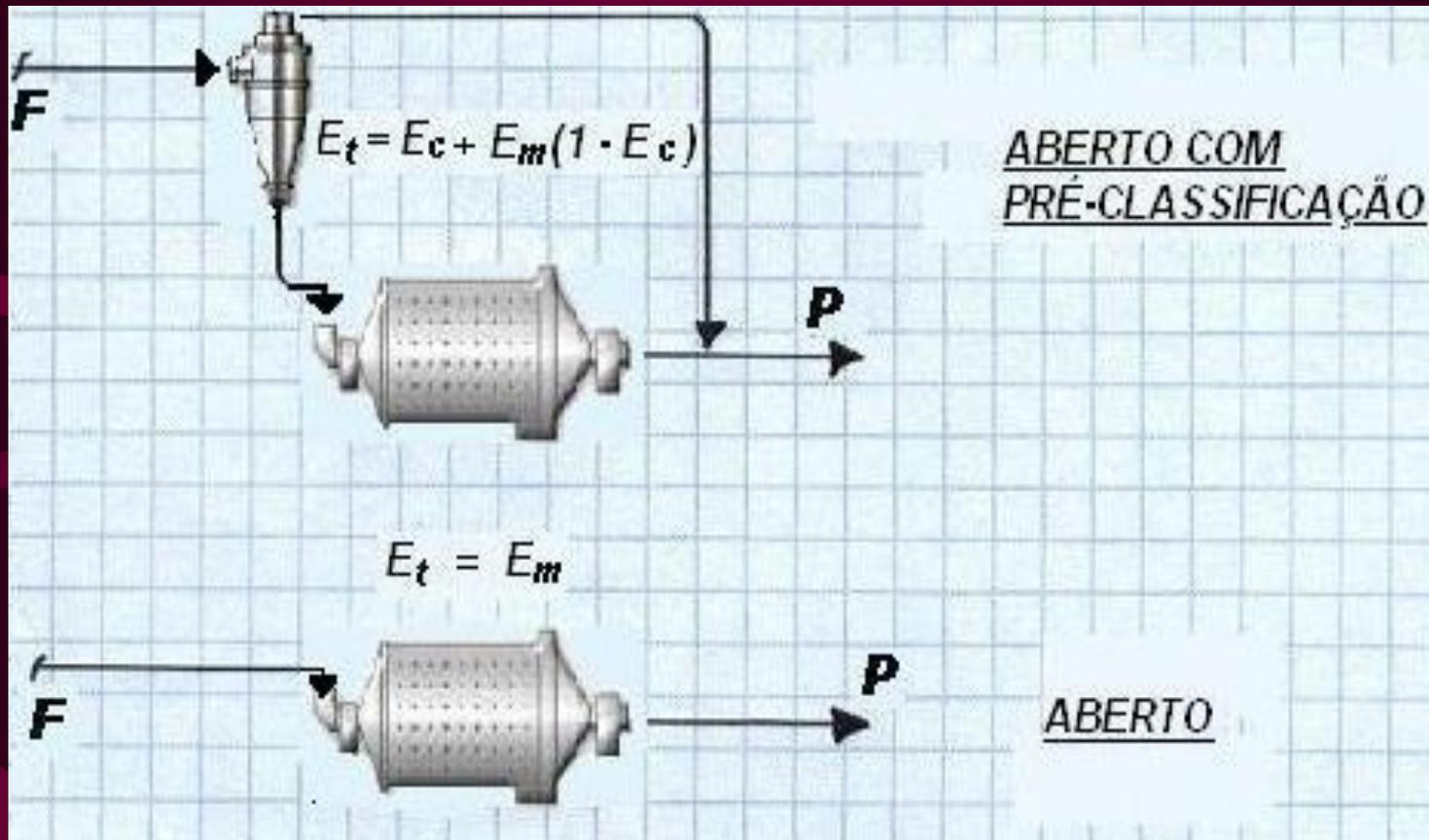


Moagem: circuito fechado

Eficiência Dinâmica dos Classificadores – E_c'



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.



Estudos de Otimização Operacional

- **Reologia da Polpa**
 - Viscosidade / % Sólidos
- **Corpos Moedores**
 - Tamanho e % Enchimento
- **Avaliação e Ajuste do Circuito**
 - Carga Circulante e Critérios de Operação

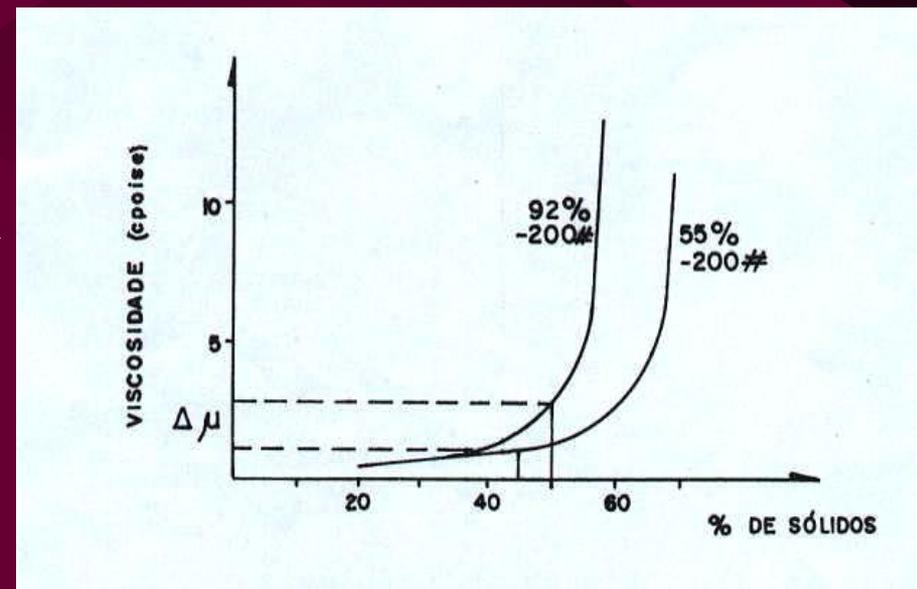


Estudo Reológico da Polpa

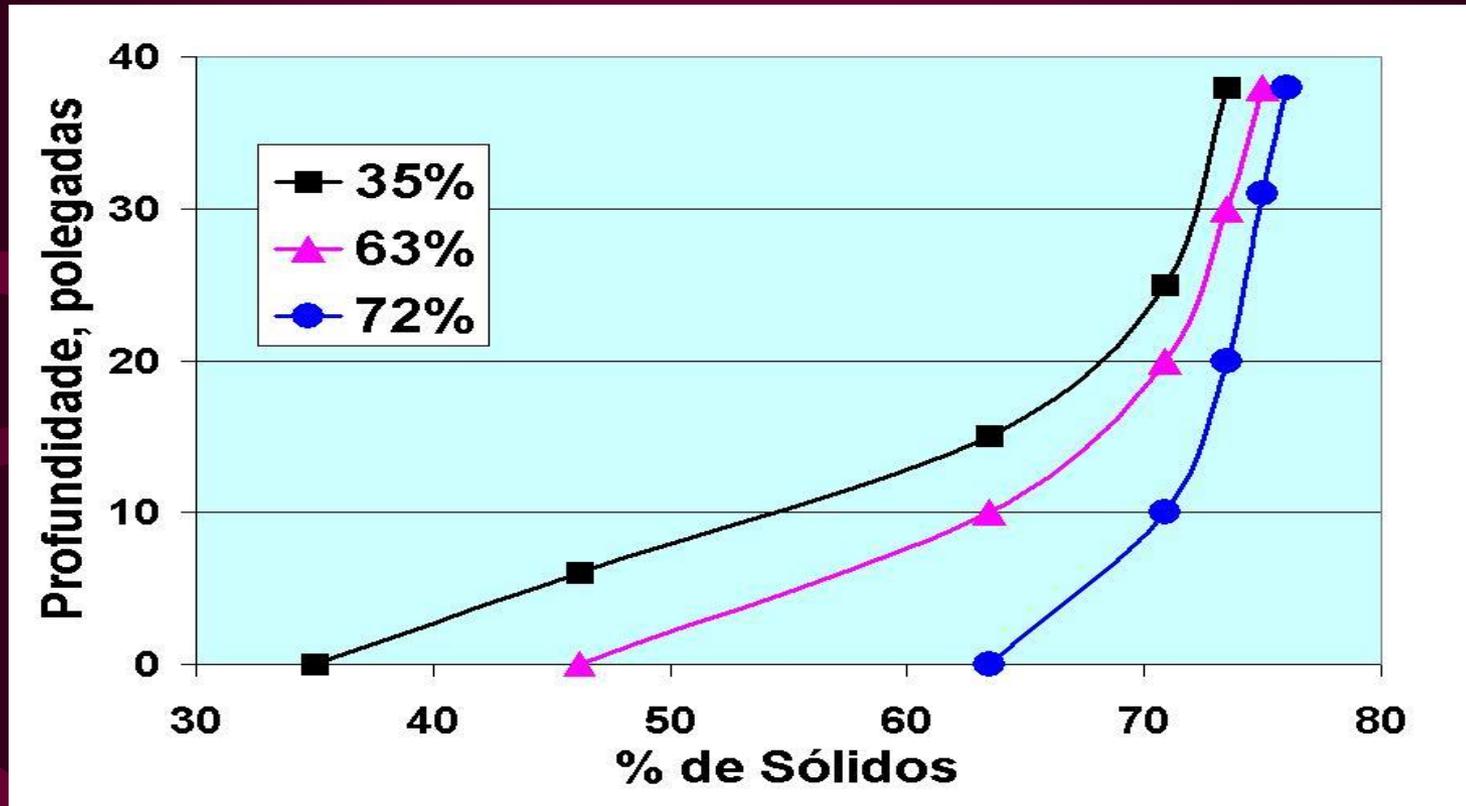


Os mecanismos principais da operação de Moagem dependem diretamente da viscosidade da polpa.

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



Densidade da Polpa



Estudo de Corpos Moedores

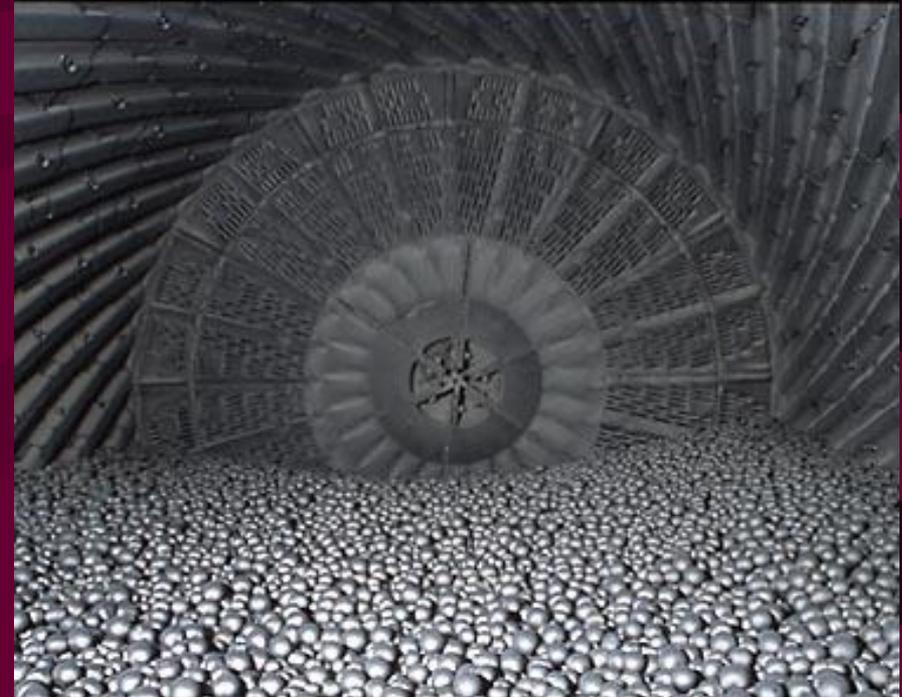
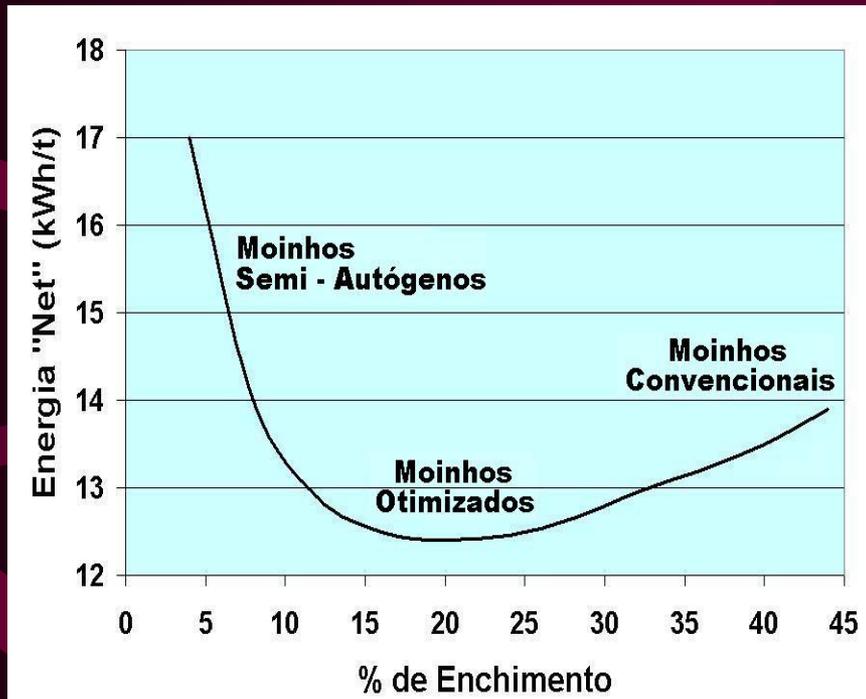


Bolas menores significam uma maior frequência das *colisões* com a rocha, porém de menor intensidade (ΔE).

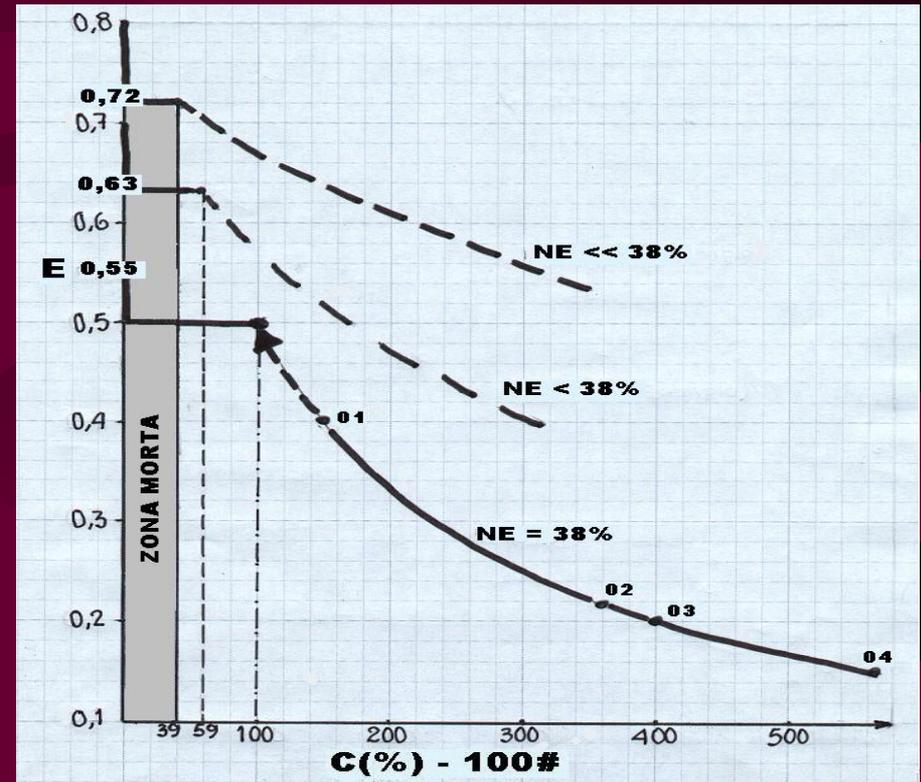
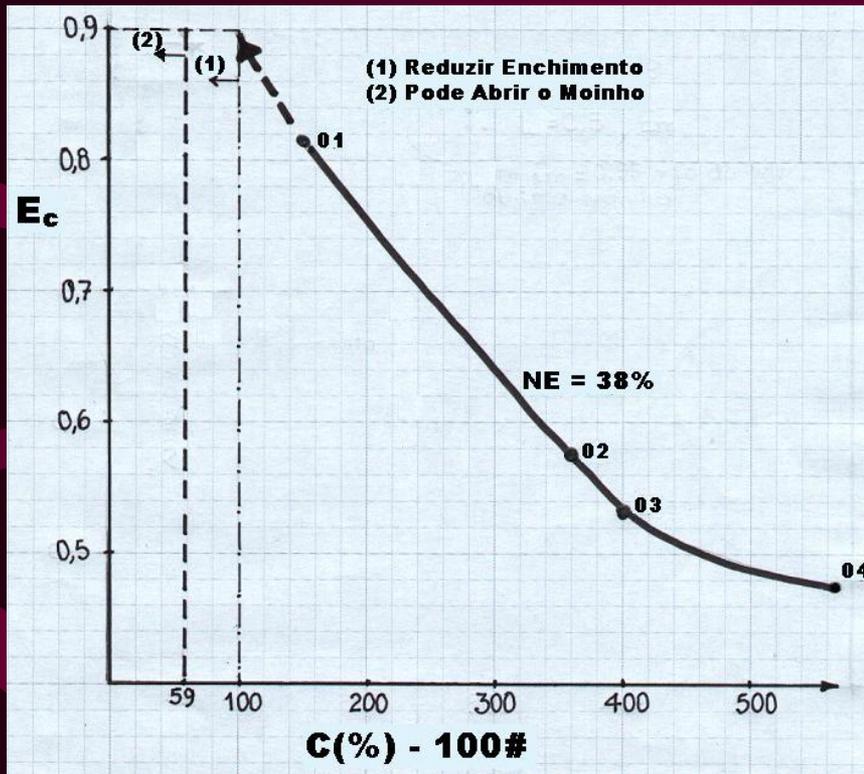
A carga moedora vá, com o tempo, adquirindo exatamente o perfil de equilíbrio para o processo, na sua distribuição de tamanhos.



Nível Ótimo de Enchimento

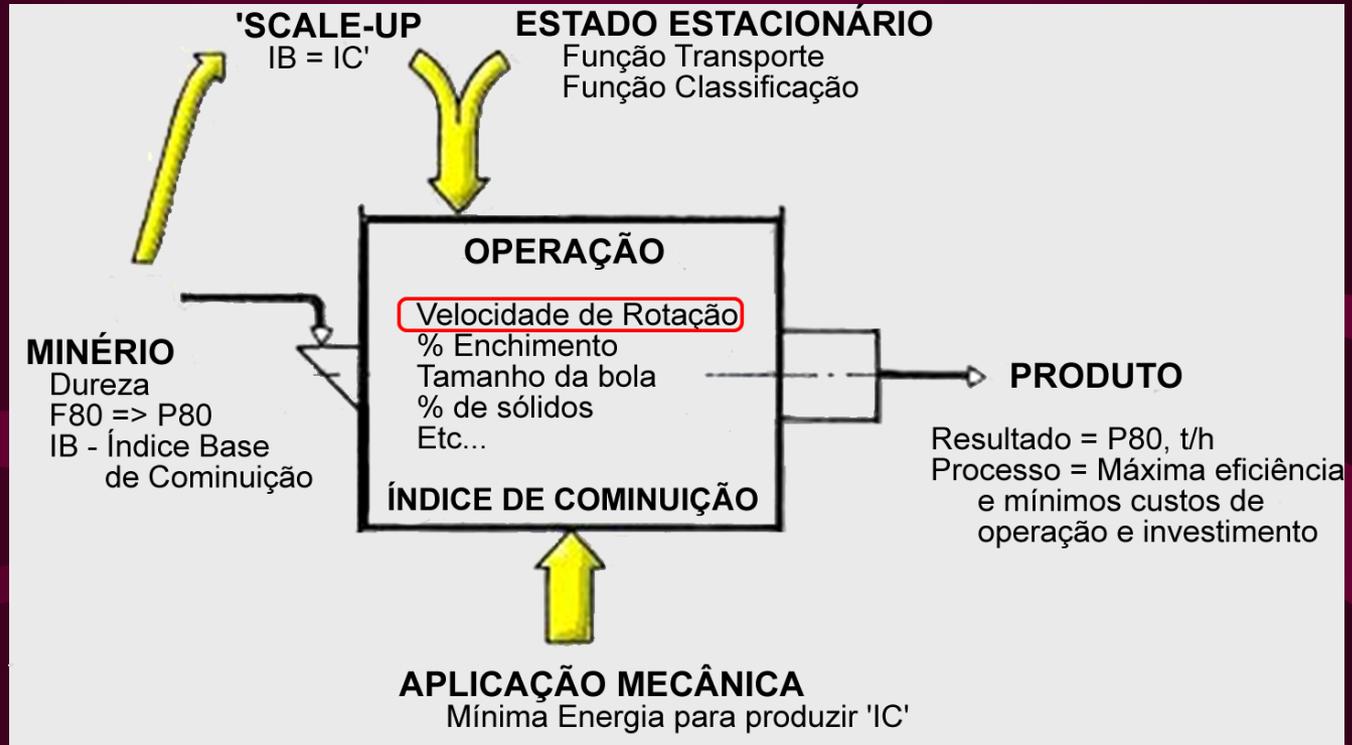


Carga Circulante



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)



Variáveis de Controle

DO PROCESSO

- Umidade do minério alimentado.
- Tamanho da alimentação (**F80**).
- Tamanho do produto (**P80**) e Liberação (Φ).
- Peso específico médio do material.
- Peso específico do componente mais duro e pesado.
- Valor estimado de dureza (O programa recalcula e ajusta este valor).

CONDIÇÕES MECÂNICAS

- Dados básicos relativos ao equipamento.



Variáveis de Controle

DA OPERAÇÃO

- Porcentagem da velocidade crítica.
- Tipo de corpo moedor (volume aparente, consumo específico e peso específico).
- Diâmetro (tamanho) do corpo de reposição.
- Nível estimado de Enchimento (o programa o recalcula e ajusta).
- Porcentagem de sólidos na moagem.
- Porcentagem de carga circulante.
- Porcentagem de sólidos na polpa bombeada.



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

