

Aula 9. Operações Mecânicas com Sólidos Granulares

Parte I – Cominuição

Prof. Dr. Wanderley P. Oliveira

Hyderabad - IN

OPERAÇÕES MECÂNICAS COM SÓLIDOS GRANULARES

- Fragmentação de sólidos;
- Separação de tamanhos;
- Mistura de sólidos;
- Transporte e a compactação de sólidos.

http://www.particles.org.uk/particle_technology/index.htm

I.1 – Fragmentação

→ Operação também conhecida como moagem e cominuição, consiste na redução de tamanho de um determinado material.

– CLASSIFICAÇÃO OPERAÇÕES DE MOAGEM

→ Grosseira, intermediária ou fina:

Grosseira \cong 20 mesh

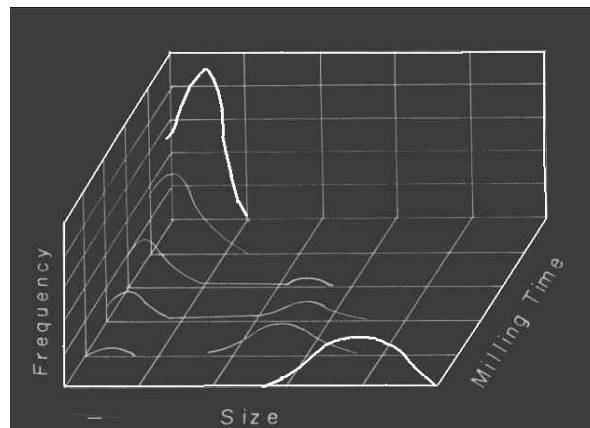
Intermediária \cong 200 – 20 mesh (74 a 840 microns)

Fina $<$ 200 mesh

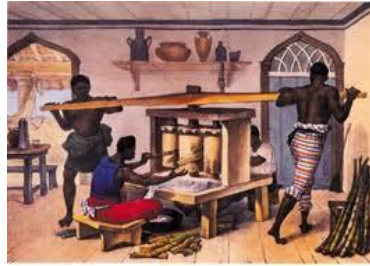
PS: Um dado moinho pode operar em mais de uma classe

Cominuição

Mudar a distribuição granulométrica



A redução de tamanho ao longo da História



APLICAÇÕES FARMACÊUTICAS:

- preparo de suspensões;
- facilitar mistura dos componentes em uma mistura para drageamento;
- Aumentar a área superficial;
- redução do volume do material.

*** INDÚSTRIA FARMACÊUTICA →**

Ex: - Produtos químicos;

- Tecidos animais;

**- Compostos vegetais: { duros: sementes;
fibrosos: raízes;
moles: flores e folhas**

↳ Inúmeros métodos de fragmentação podem ser empregados.

↳ FATORES A SEREM CONSIDERADOS

a) Dureza (Escala de Moh's: Grafite/Talco: 1; Diamante: 10)

- **1 – 3: Materiais moles – Riscados com a unha;**
- **3 – 7 : Materiais intermediários;**
- **7– 9: Materiais duros – Riscados com uma faca.**

b) Elasticidade (Ex. borracha e giz)

c) Abrasividade

d) Aderência

- e) Temperatura de amolecimento do material**
- f) Estrutura do material**
- g) Efeito fisiológico do material**
- h) A pureza do produto**
- i) Relação Tamanho do prod/Tamanho Alimentado**
- j) A densidade do material**

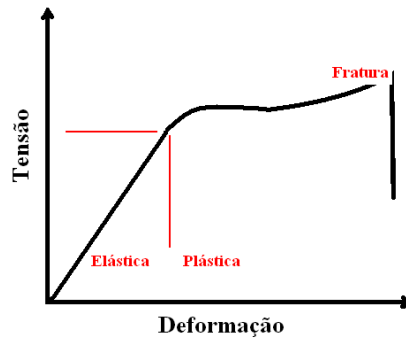
– Consumo de Energia na Fragmentação

> 98% de Perdas:

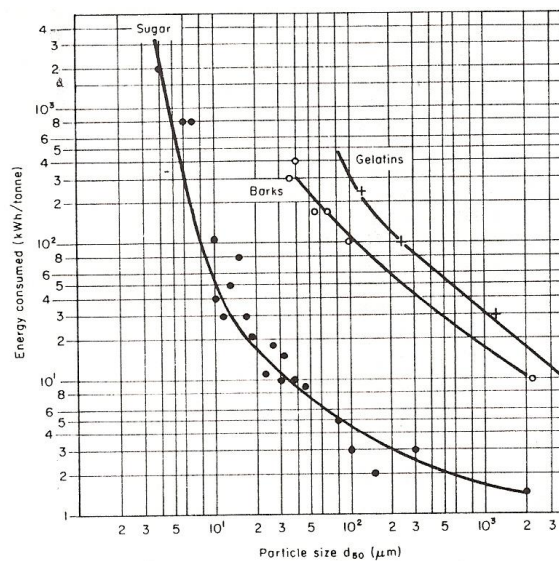
- **deformação do material sem fratura;**
- **deformações c/ fratura;**
- **distorções do equipamento,**
- **atrito partículas-partículas partícula/equipamento,**
- **aquecimento do material e equipamento,**
- **vibração,**
- **barulho, etc.**

COMINUIÇÃO

- Processo basicamente energético:
- Energia necessária para ruptura do material
- Deformação elástica-plástica-ruptura



ENERGIA X TAMANHO



- Estimativa da energia consumida na fragmentação

a) **LEI DE KICK:**

$$W = K \ln\left(\frac{D_1}{D_2}\right) = K \ln(m)$$

W = consumo de energia/unidade de massa;
m = D_1/D_2 = razão de fragmentação;
K = const. experimental que depende do equip. e tipo de material.

$$W_t = C \cdot W = K \cdot C \cdot \ln(m)$$

W_t = consumo total
C = Capacidade de moagem

b) **LEI DE RITTINGER** (+ usada que a Lei de Kick – $E \approx$ nova superfície formada).

“O trabalho necessário para fragmentar o sólido é proporcional ao aumento de superfície produzido”

$$W = K_R \left(\frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_1} \right)$$

K_R = constante experimental que depende do equipamento e tipo de material;

W = consumo por unidade de massa e por unidade de tempo

$$W_t = C \cdot W = K_R \cdot C \cdot \left(\frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_1} \right)$$

W_t = consumo total

C = Capacidade de moagem

D = diâmetro de partícula

EXEMPLO: Consome-se 30 HP para moer 140 ton/h de um material de 2 mm e para 1 mm. Qual a energia necessária para moer 120 ton/h do mesmo material entre 1 e 0,5 mm?

$$W_i = C \cdot W = K_R \cdot C \cdot \left(\frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_1} \right)$$

$$\frac{W_{i2}}{W_{i1}} = \frac{C_2 \cdot W_2}{C_1 \cdot W_1} = \frac{K_R \cdot C_2 \cdot \left(\frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_1} \right)}{K_R \cdot C_1 \cdot \left(\frac{1}{D_2^1} - \frac{1}{D_1^1} \right)}$$

$$\frac{W_{i2}}{30} = \frac{120 \cdot \left(\frac{1}{0,5} - \frac{1}{1} \right)}{140 \cdot \left(\frac{1}{1} - \frac{1}{2} \right)} = 1,72 \rightarrow W_{i2} = 51,6 \text{ HP}$$

Refazer o exercício utilizando a Lei de Kick.....

c) LEI DE BOND (Estimativas + realistas).

$$W = w_i \sqrt{\frac{100}{D_2}} \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{m}} \right)$$

$$W_i = C \cdot W$$

D_2 é dado em μm , e w_i é o índice de trabalho do material,
 C = capacidade moagem (ton/h).

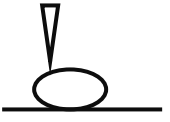
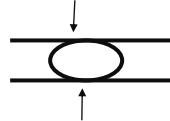

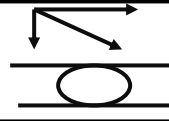
$W = \text{kWh/t}$

↪ Índices de trabalho para moagens a úmido (kWh/t) -

↪ Moagens a seco multiplicar pôr 1,34

Material	Densidade	Índice de trabalho
Argila	2,51	6,30
Ardosia	2,57	14,30
Arcia	2,65	16,46
Barita	4,28	6,24
Bauxita	2,20	8,78
Basalto	2,89	20,41
Blenda	3,68	12,42
Calcáreo	2,66	12,74
Carbureto de silício	2,73	26,17
Cascalho	2,63	15,87
Carvão	1,40	13,00
Cimento	2,67	10,57
Clinquer	3,09	13,49
Coque	1,31	15,13

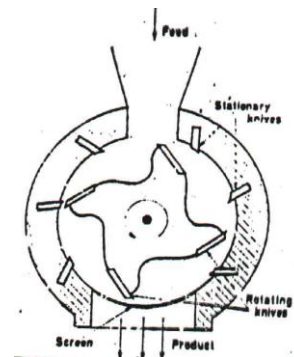
- Mecanismos de Fragmentação

T A M A N H O P A R T Í C U L A		GUILHOTINA LÂMINAS TESOURA	
		QUEBRA NOZES	
		MARTELO	
		LIMA	
	CORTE		
	COMPRESSÃO		
	IMPACTO		
	Pressão e fricção		

↳ Equipamentos Para a Fragmentação

Moinhos de corte:

- Adequado para materiais moles: Ex. raízes, madeiras, peles e tecidos animais



↵ Faixa de redução de tamanho – métodos corte

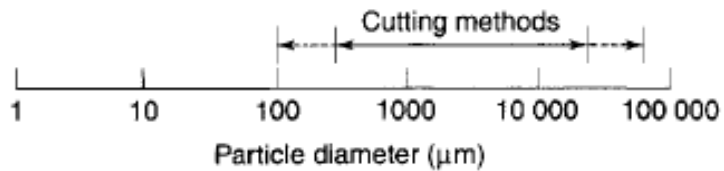


Fig. 11.5 Size reduction range for cutting methods.

OBTENÇÃO DE PÓS

Almofarizes



Gral e pistilo



Faixa de redução



Compressão

OBTENÇÃO DE PÓS

Moinho de rolos

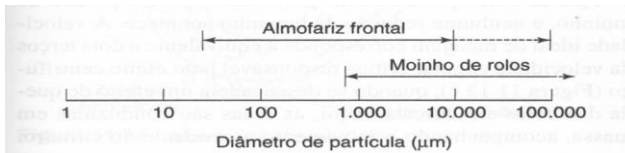
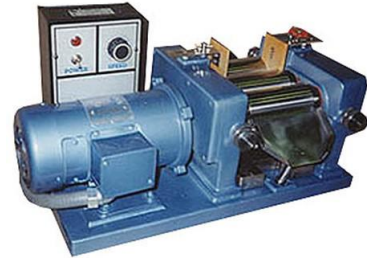
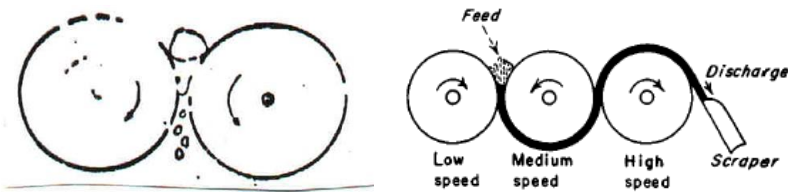
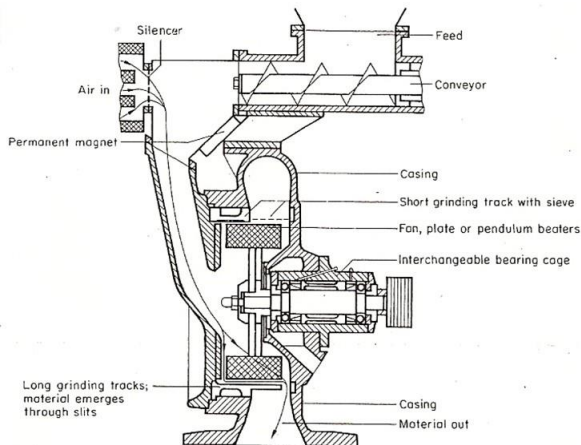


Figura 11.7 Faixa de redução de tamanho para métodos por compressão.

compressão

Obtenção de Pós

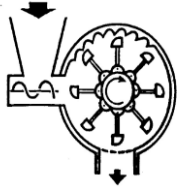
Moinho de pás



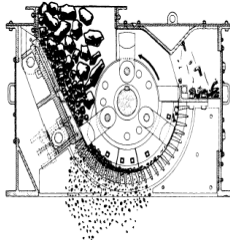
Impacto

MOINHO DE MARTELOS

Obtenção de Pós



IMPACTO



↳ **Vantagens:**

- ❑ operação rápida;
- ❑ variadas faixas granulométricas para o produto;
- ❑ operação contínua;
- ❑ pequeno risco de contaminação do produto.

↳ **Desvantagens:**

- ❑ A alta velocidade de operação causa o aquecimento do material no equipamento, podendo degradar materiais termosensíveis;
- ❑ risco de entupimento;
- ❑ perigo de quebra do equipamento por corpos estranhos na alimentação.

MOINHO VIBRATÓRIO

Obtenção de Pós

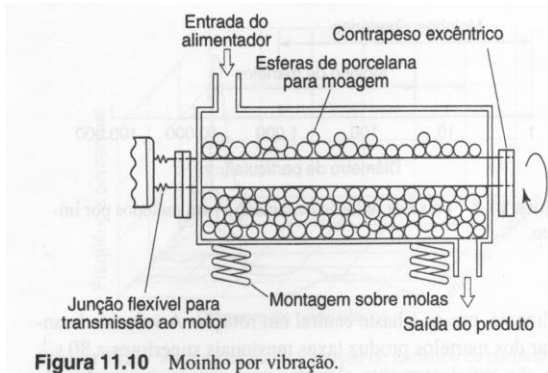


Figura 11.10 Moinho por vibração.

IMPACTO

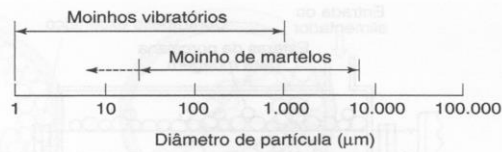
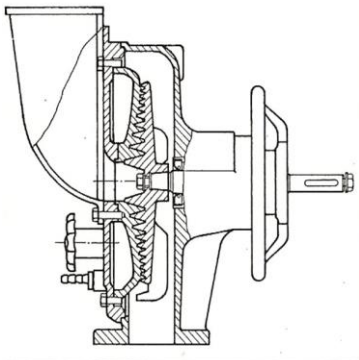


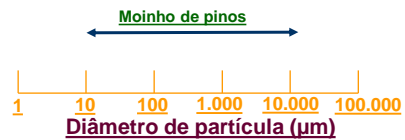
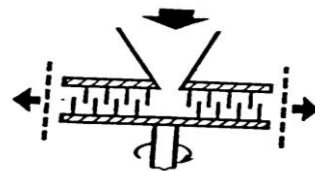
Figura 11.8 Faixa de redução de tamanho para métodos por im-

OBTENÇÃO DE PÓS

Moinho de Discos Dentados

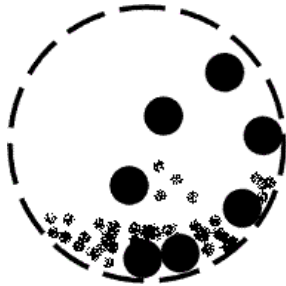


Moinho de Pinos

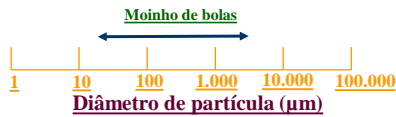
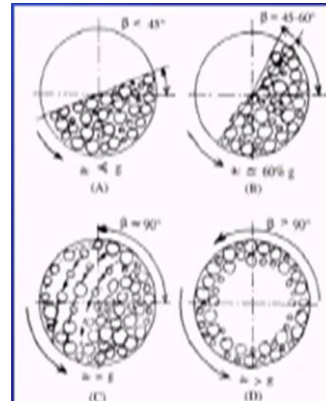
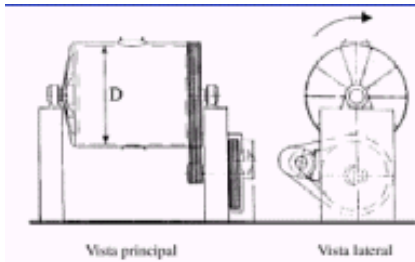


MOINHO DE BOLAS

OBTENÇÃO DE PÓS



IMPACTO E ATRITO

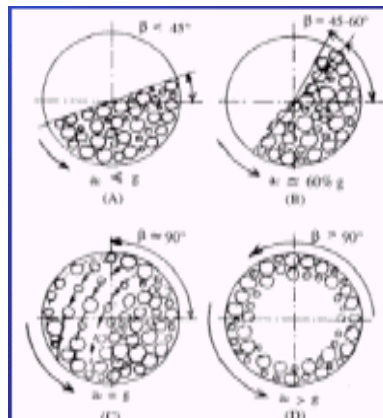
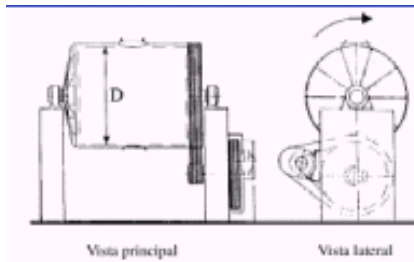


Fragmentação

- **Impacto e atrito Combinados:** Moinho de bolas.

Indústria Farmacêutica:

$D \approx 1 \text{ m}$; $D_b \approx 20 \text{ à } 150 \text{ mm}$ (30 à 50 % do volume do cilindro).



Rotação Crítica de Moinho de Bolas:

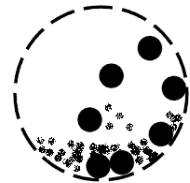
$$n_c = \frac{423}{\sqrt{D - D_b}}$$

D = diâmetro do moinho; D_b = diâmetro das bolas, ambas em cm; e n_c é dado em rpm.

- INDÚSTRIA FARMACÊUTICA:

D \approx 1 m; $D_b \approx$ 20 à 150 mm (30 à 50 % do volume do cilindro).

Faixas de operação de moinhos de bolas:



↪ **65 a 70% de n_c** moagem fina a úmido com suspensões viscosas;

↪ **70 a 75% de n_c** moagem fina a úmido com suspensões pouco viscosas;

↪ **75 a 80% de n_c** moagem a seco ou, a úmido de partículas grandes

Outros moinhos:

Fragmentação

- ↘ moinhos de energia fluida;
- ↘ moinhos coloidais: produção de suspensões e emulsões coloidais (partículas $< 1 \mu\text{m}$).

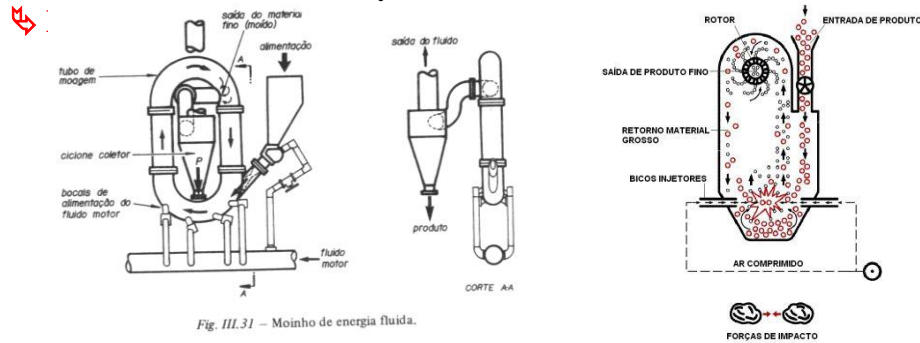
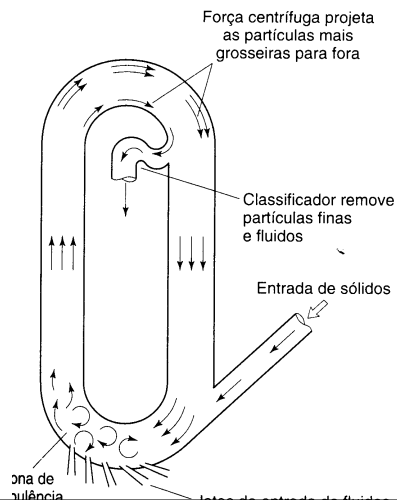


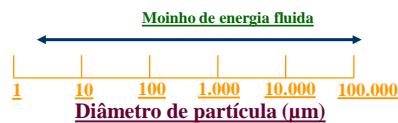
Fig. III.31 – Moinho de energia fluida.

MOINHO DE ENERGIA FLUIDA

OBTENÇÃO DE PÓS



Impacto e atrito

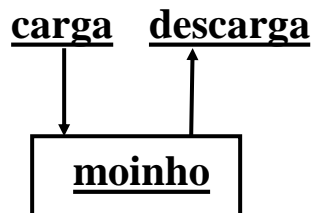




Ex. Moinhos coloidais

-Tipos de Operações de Moagem:

a) Operação em batelada ou contínua:



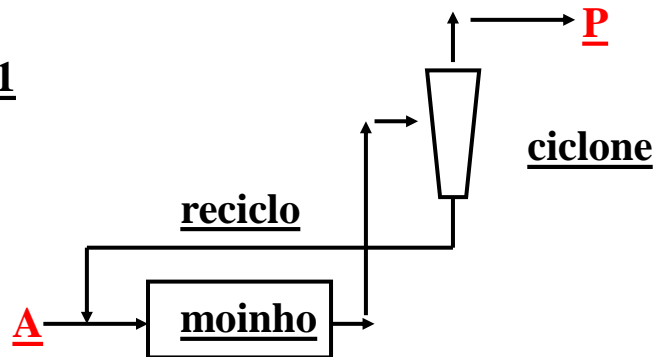
Operação em
Batelada



Operação Contínua
em circuito aberto

↪ Circuito aberto ou fechado

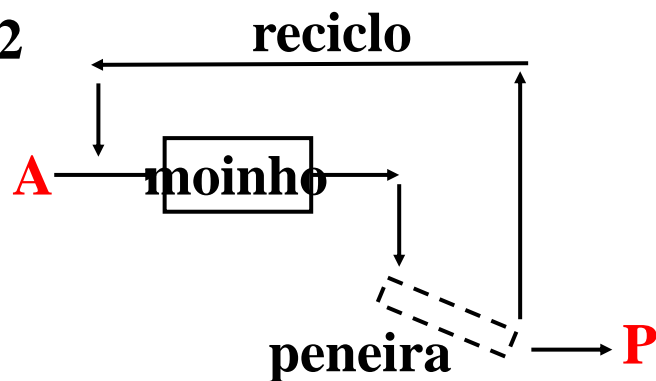
Ex.1



Operação em circuito fechado com separação a seco

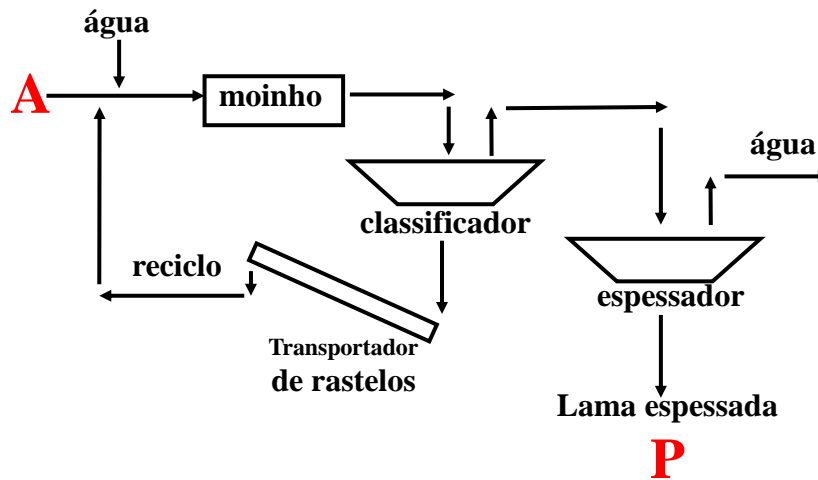
↪ **Circuito aberto ou fechado**

Ex.2



Operação em circuito fechado com separação a seco

Moagem a seco ou a úmido



Operação em circuito fechado com separação a úmido em um estágio

> <http://www.nzifst.org.nz/unitoperations/sizereduction1.htm>

Obtenção de Pós

Seleção do métodos de redução do tamanho de partícula

- Propriedades físico-químicas do material
- Forma da partícula
- Uso do pó e tamanho de partícula requerido
- Custo do processo
- Conhecimento das influências relativas ao processo e variabilidade do material