

# Processamento de Materiais Cerâmicos

## Beneficiamento de matérias-primas

---

Quanto mais específica a aplicação de um produto cerâmico e, ainda, quanto maior o grau de automatização na produção do mesmo, maior a necessidade de tratamento das matérias-primas (MP) envolvidas no desenvolvimento de um corpo cerâmico.



Beneficiamento envolve:

diminuição do tamanho de partículas da

---

MP

- ❖ classificação granulométrica
- ❖ etapas de purificação química e operações unitárias, como:
  - filtração
  - flotagem
  - lavagem
  - lixiviação



---

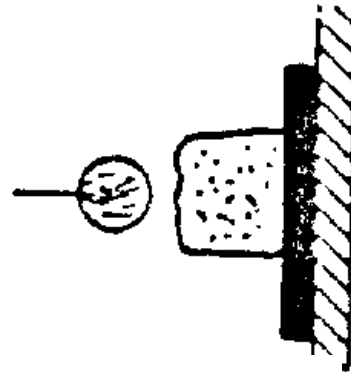
# 1. Cominuição/Moagem

# Modos de desintegração

[Navarro, 1985/3:334]



Compressão



Choque +  
compressão



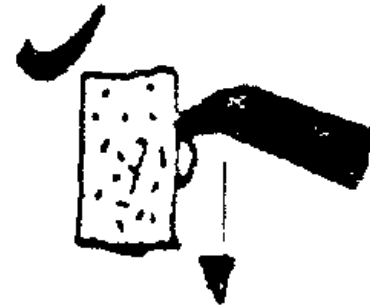
Desagregação



Choque  
recíproco



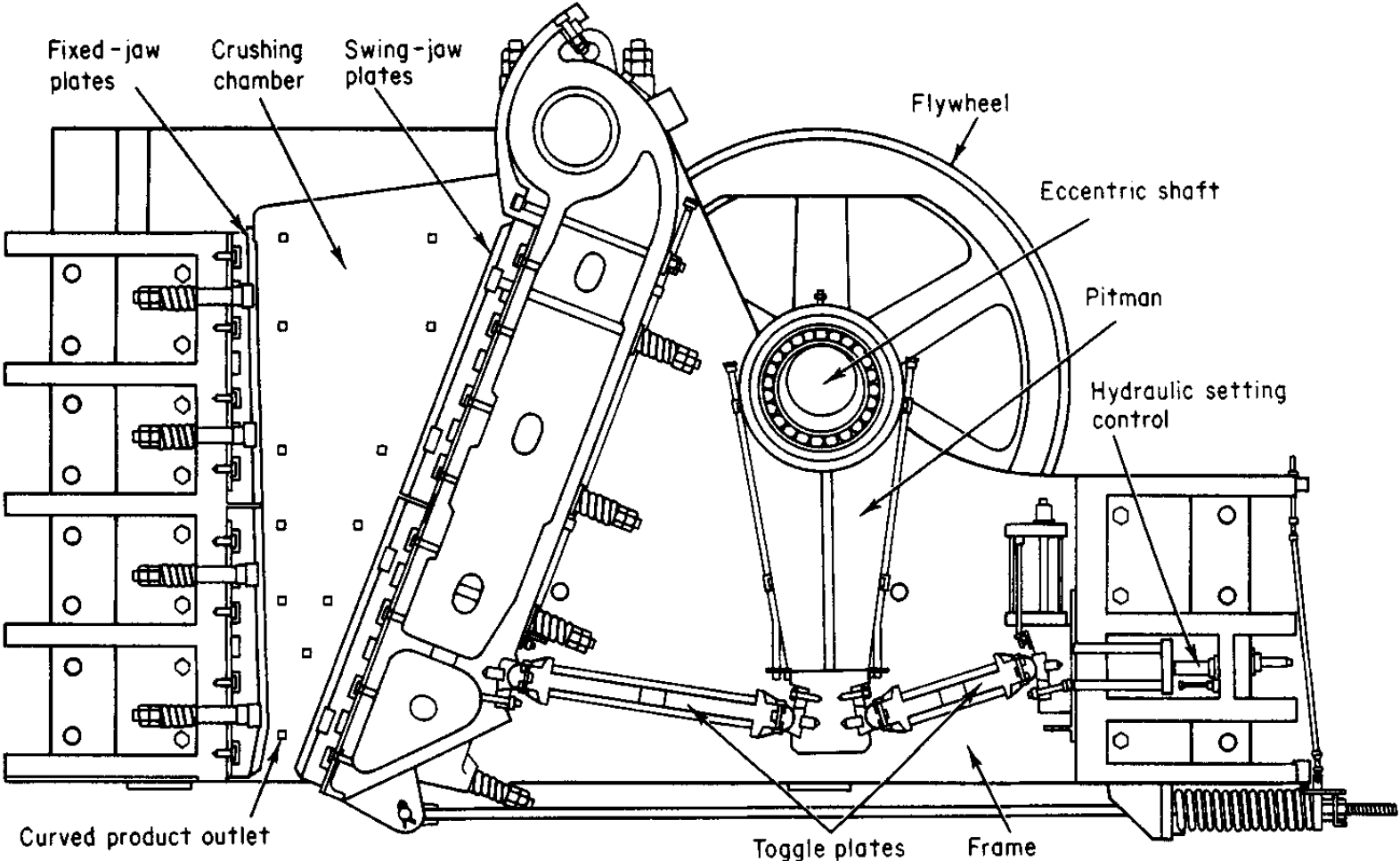
Abrasão



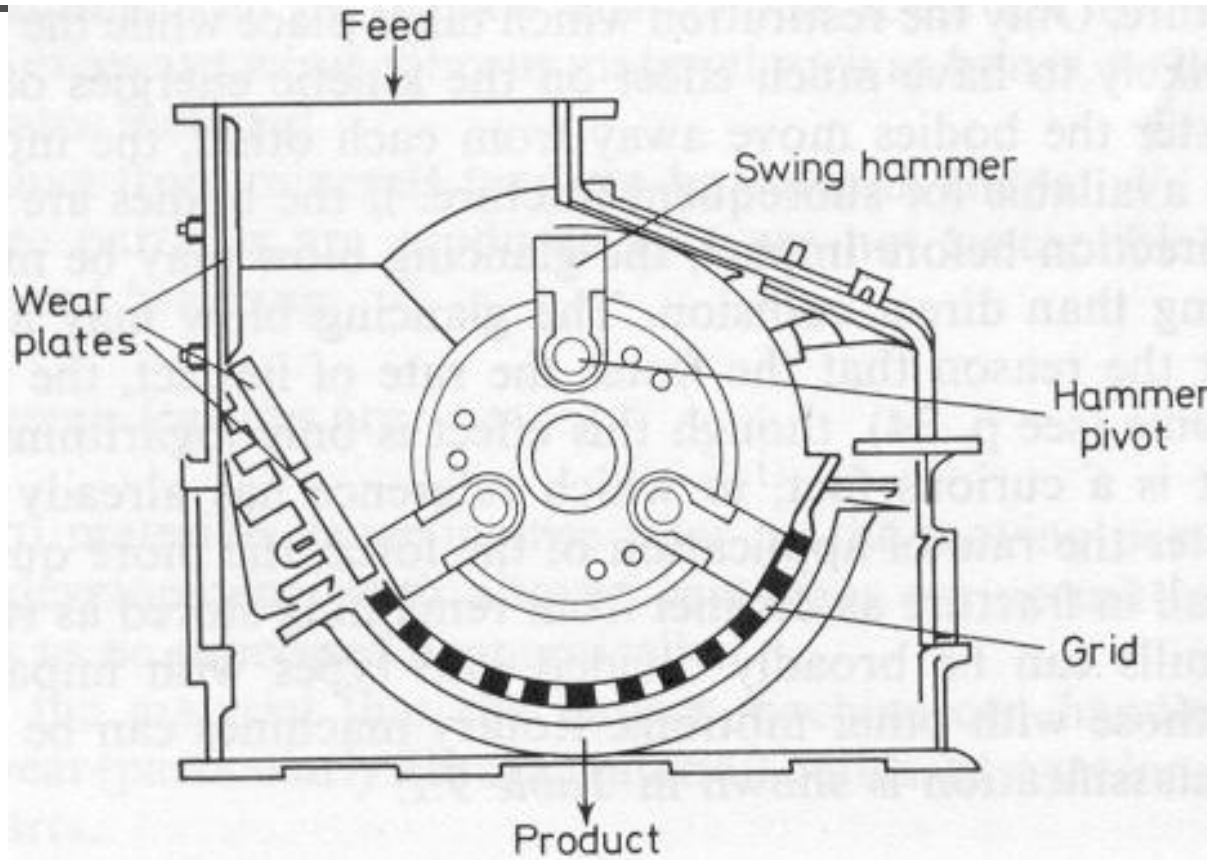
Corte

# 1. Britagem

## Britador de mandíbulas



# Britador de martelos





## 2. Moagem

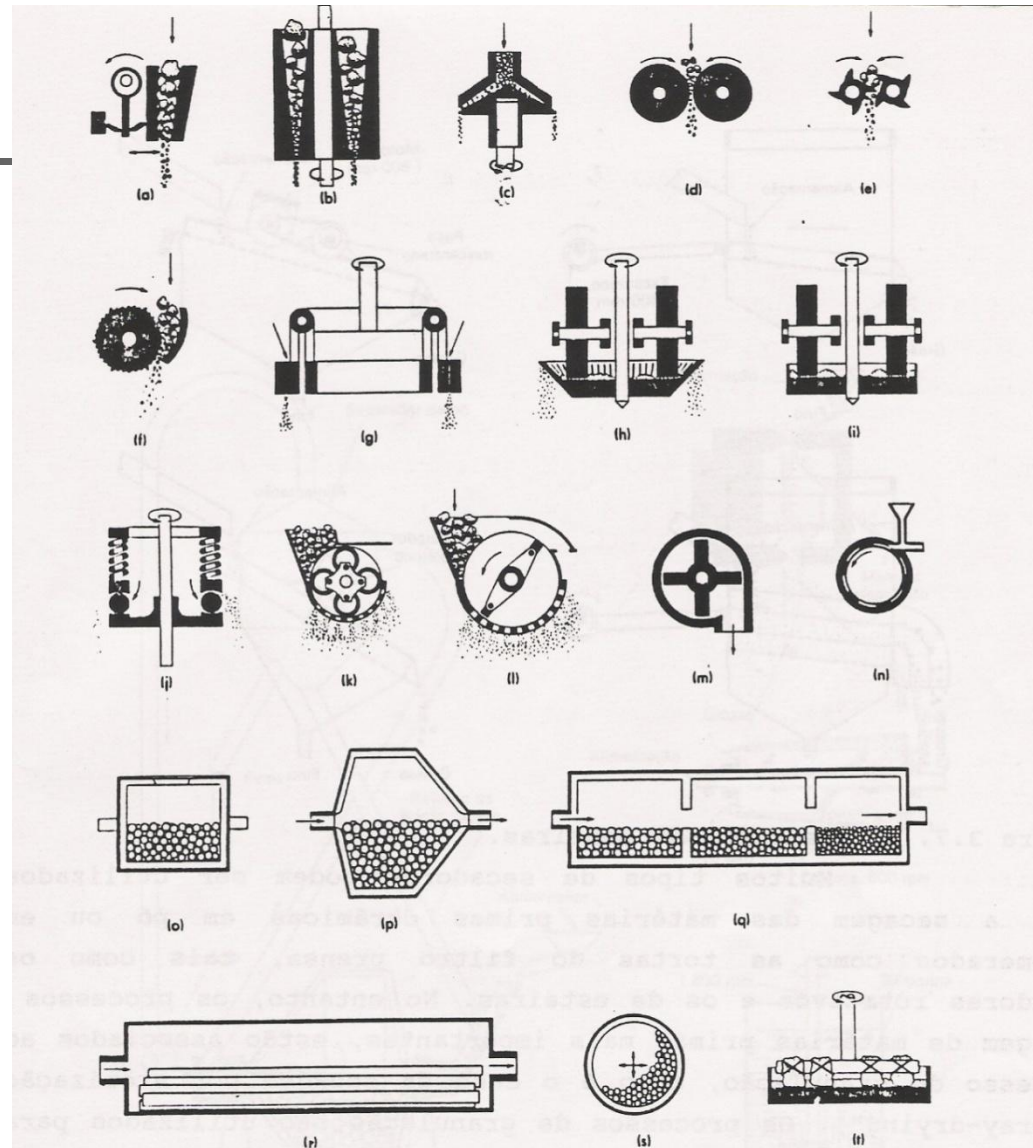
---

# Objetivos da Moagem

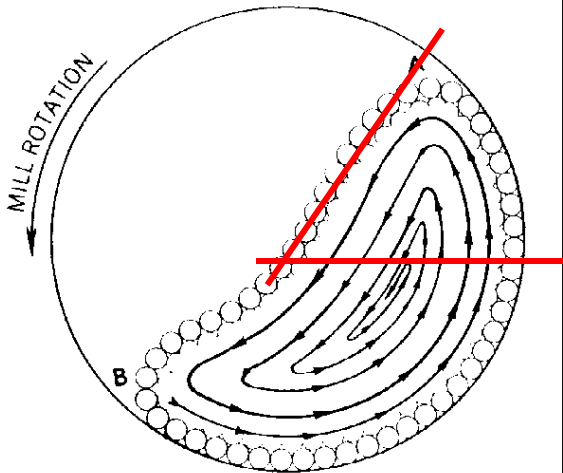
- Reduzir de tamanho de partícula
  - Reduzir da porosidade das partículas
  - Dispersar aglomerados e agregados
  - Reduzir o tamanho de partícula máximo
  - Aumentar a concentração de partículas coloidais
  - Modificar o formato das partículas
  - Misturar diferentes componentes



# Cominuição ou moagem



# Moinho de Bolas



$$\theta = 50 - 60^\circ$$

A moagem ocorre devido ao "efeito cascata"

Velocidade Angular Crítica:

$$\omega_{cr} = 0,5 \cdot R^{-1/2}$$

Condição ideal:

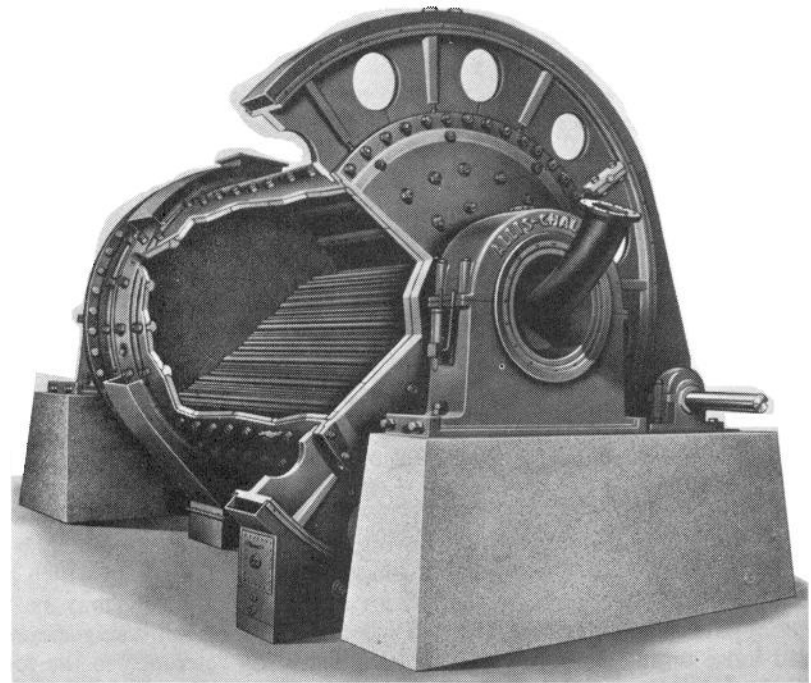
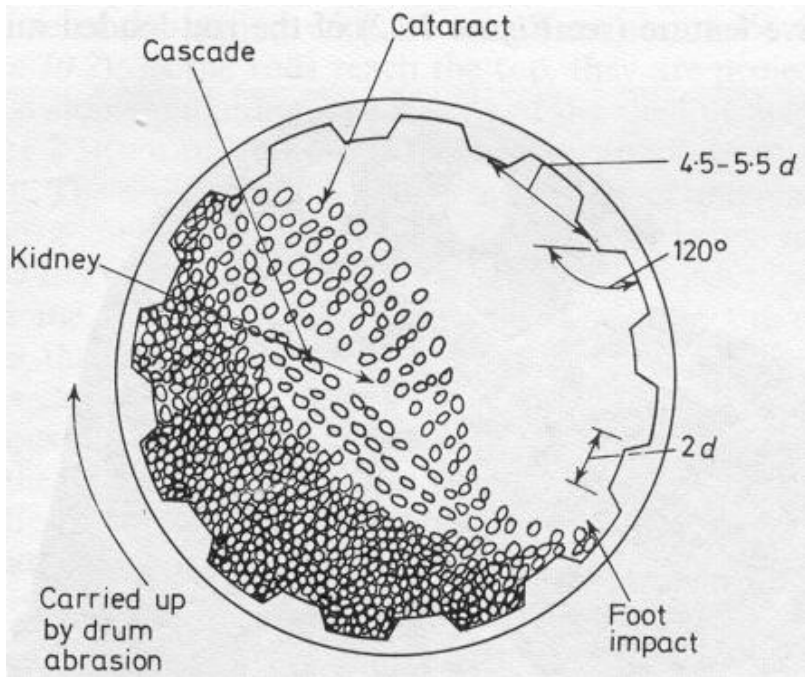
$$\omega = (0,65 - 0,85) \cdot \omega_{cr}$$

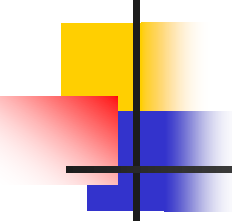


# Condições de Carregamento (moinho de bolas)

- ✓ O meio de moagem ocupa cerca de **50% do volume do moinho**
- ✓ O volume de suspensão deve ser pouco maior do que os espaços vazios entre os elementos do meio de moagem
- ✓ Outras variáveis importantes:
  - ◆ Viscosidade da suspensão (500 - 2000 mPa s)
  - ◆ Tamanho e geometria do meio de moagem
  - ◆ Resistência ao desgaste do meio de moagem e do revestimento do moinho

# Moinhos de bolas e de rolos



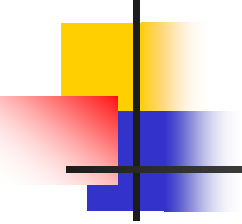


- Como selecionar o equipamento de moagem?

---

- Tamanho do alimentador
- Tamanho de partículas final desejado
- Composição do produto
- Taxa de produção desejada

# Desempenho da moagem



---

$$\frac{\text{Partículas geradas}}{\text{Tempo}} = \frac{\text{Colisões por meios}}{\text{Tempo}} \cdot \frac{\text{Impacto sobre partículas}}{\text{Colisão}} \cdot \frac{\text{Partículas geradas}}{\text{Impacto}}$$

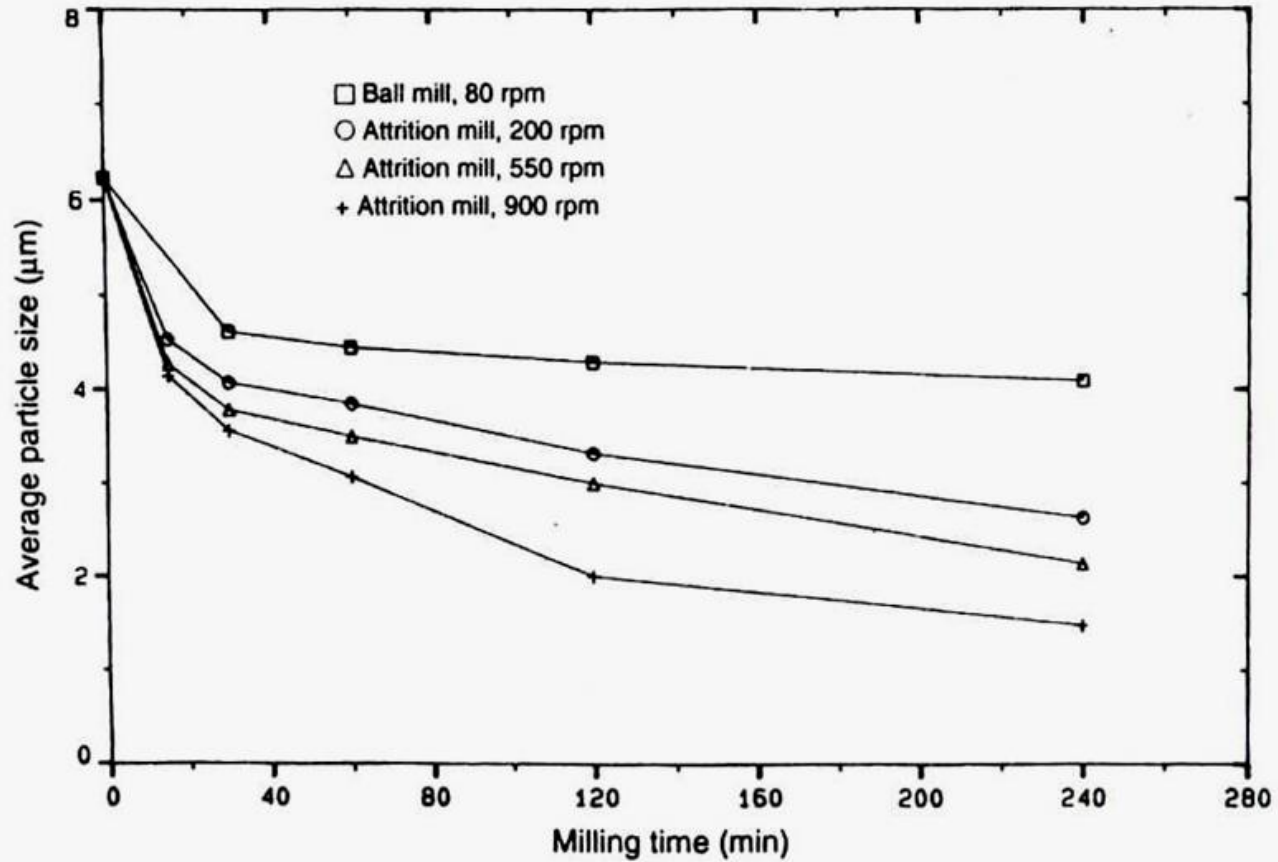
Diagram illustrating the performance of grinding, showing the relationship between generated particles, collisions, and impact efficiency.

The equation is broken down into components:

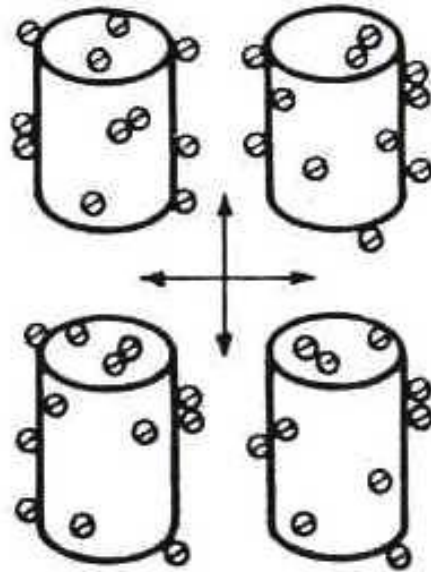
- Partículas geradas / Tempo** is labeled as **Eficiência da Moagem** (Grinding Efficiency).
- Colisões por meios / Tempo** is labeled as **Frequência de colisões** (Collision Frequency).
- Impacto sobre partículas / Colisão** is labeled as **Área de Impacto** (Impact Area).
- Partículas geradas / Impacto** is labeled as **Eficiência do Impacto** (Impact Efficiency).

The components are multiplied together to determine the overall grinding performance.

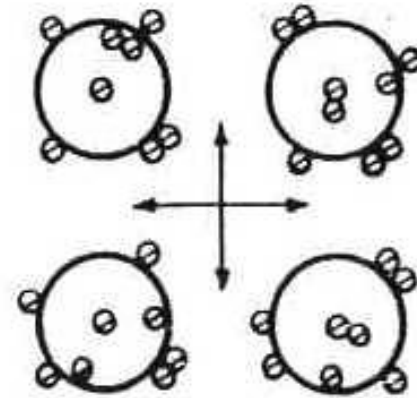
# Frequência das Colisões



# Área de Impacto



**Cylinders**



**Spheres**

- ◆ Área do cilindro > Área da esfera
- ◆ Maior no. de partículas é atingido em cada impacto



# Eficiência do Impacto



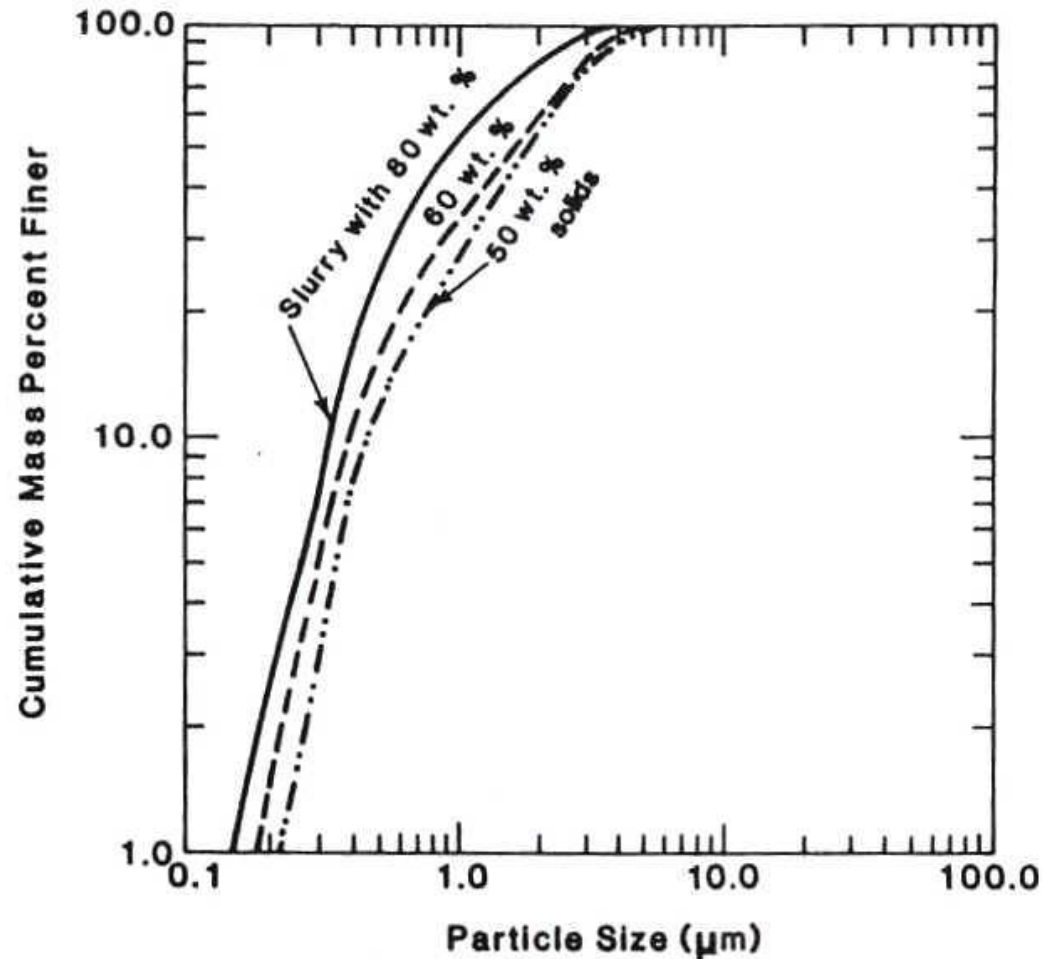
## **Probabilidade de fratura é alta quando:**

- ◆ a energia do impacto é elevada
- ◆ a resistência mecânica da partícula é baixa

## **A eficiência de moagem diminui:**

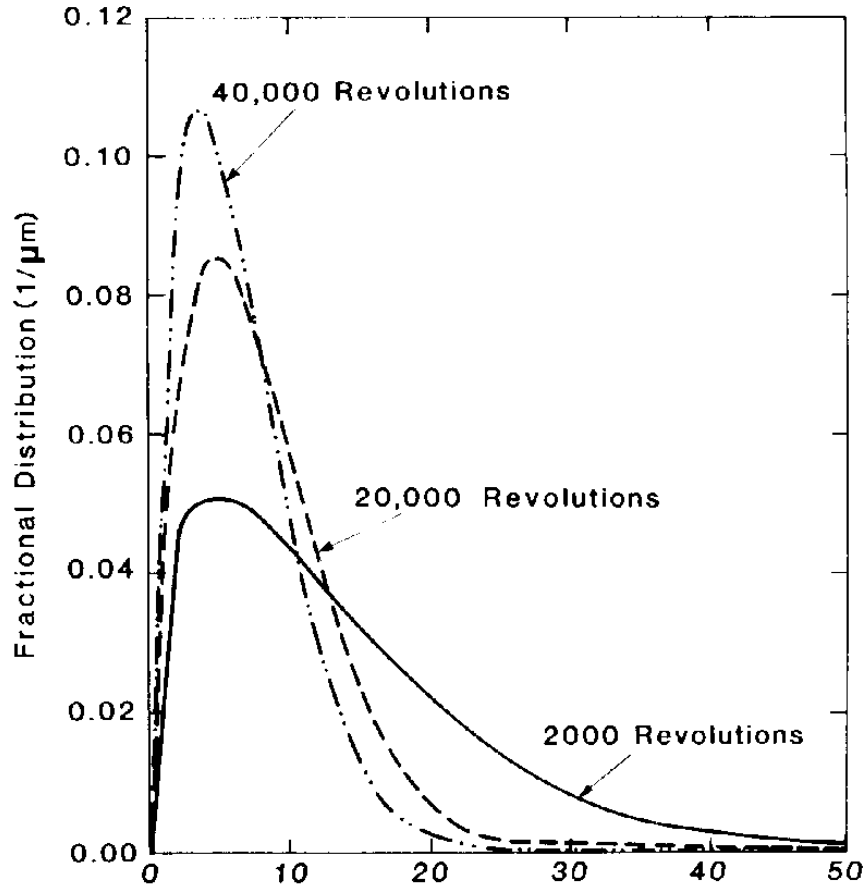
- ◆ à medida que o tamanho de partícula diminui
- ◆ se a suspensão estiver floculada (viscosidade muito alta)
- ◆ se o teor de sólidos for muito baixo (viscosidade muito baixa), permitindo que as partículas “escapem” da zona de colisão.

# Influência da concentração de sólidos em uma suspensão defloculada de alumina



# Variação de tamanho de partículas em função do tempo

[Reed, 1995:329]

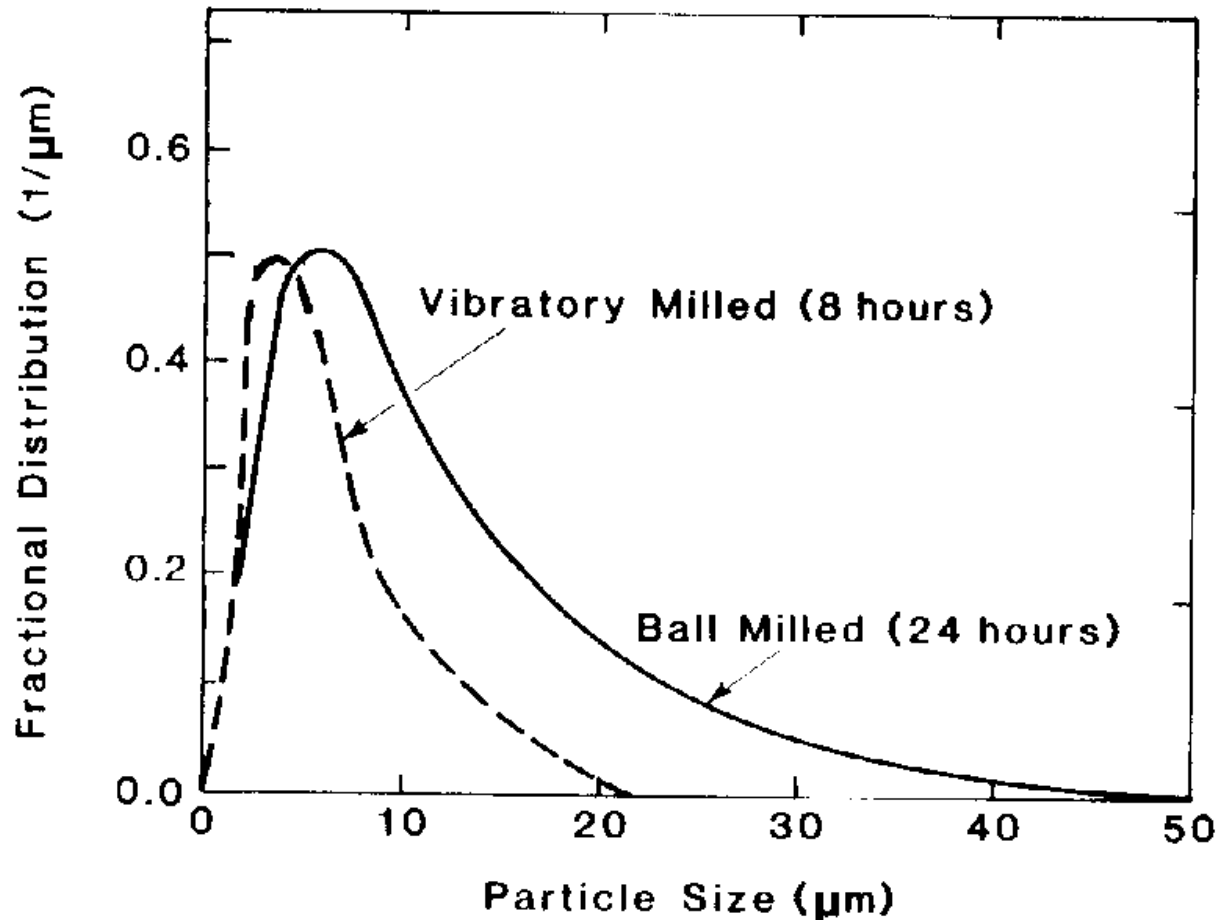


(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) calcinada

Tamanho inicial: 200 mesh

# Variação de tamanho de partículas em função do moinho

[Reed, 1995:330]





## Coesividade/adhesividade

---

- Materiais pequenos e úmidos são mais difíceis de se quebrar
- Deve-se secar o material antes da moagem ou fazer a moagem a úmido
- Para teores médios de umidade, há poucas chances de se obter sucesso na moagem (ou cominuição)



## Considerações a respeito do material a ser moído (3):

---

- Dureza do material a ser moído
  - Pontos de fusão e de escoamento
  - Flamabilidade do material
- 
- Uma grande parte da energia adicionado é convertida em calor e pode provocar a fusão ou transformações de fase do material



# 3. Processos de separação

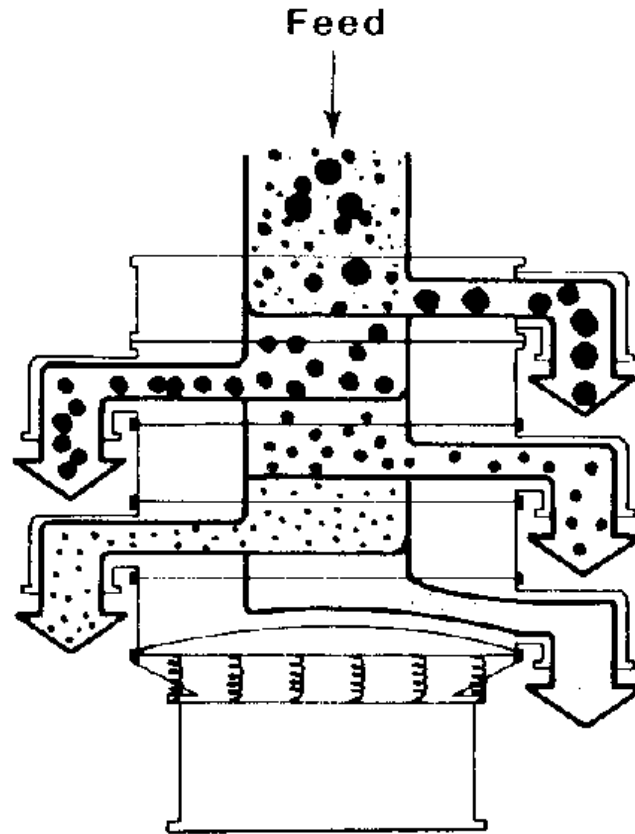
## **Classificação granulométrica**

---

- **Peneiramento**

As peneiras são classificadas de acordo com o tamanho das aberturas, pelo número de malhas por polegada linear e pelo diâmetro dos arames ou fios com que são feitas, definidas por normas técnicas.

# Peneiras

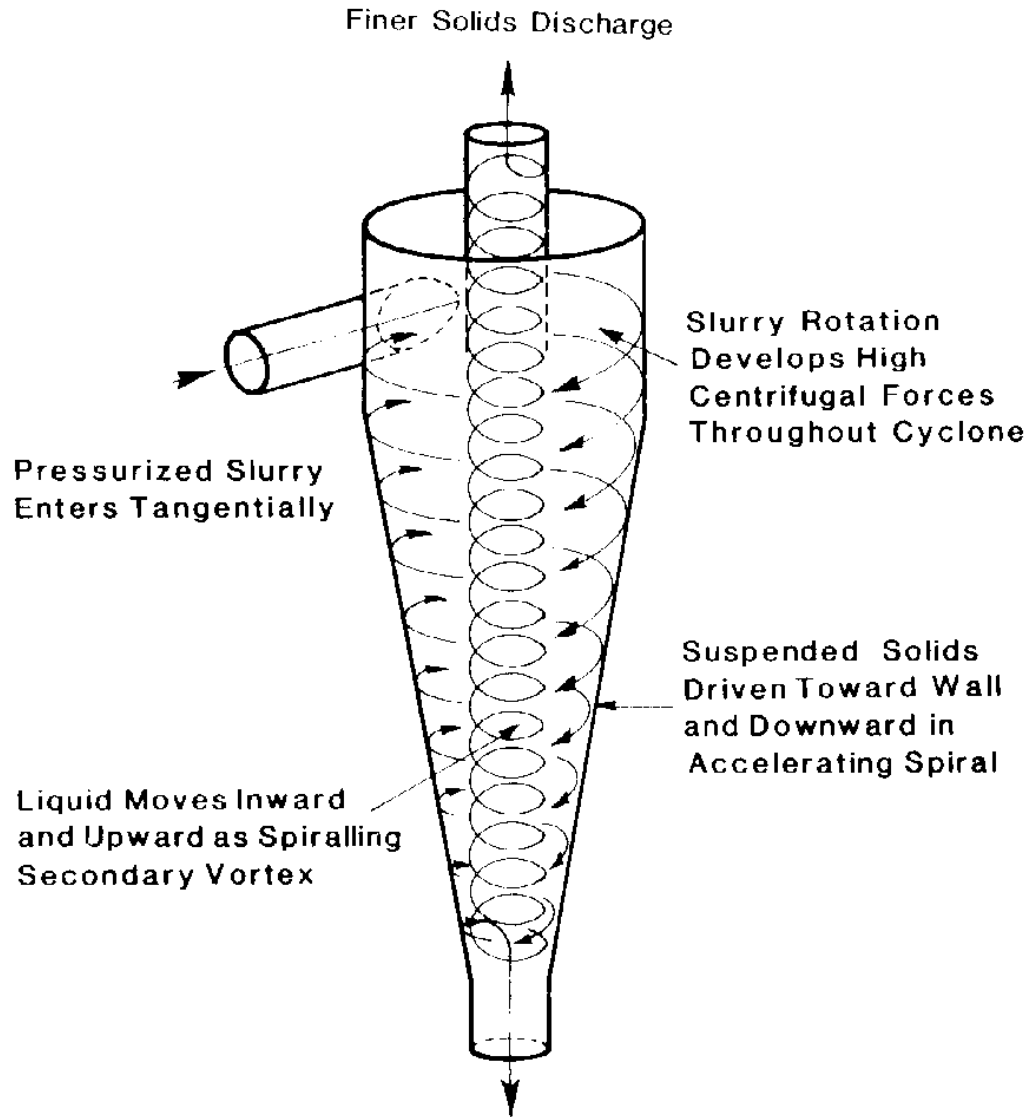


Vibratory Sieving



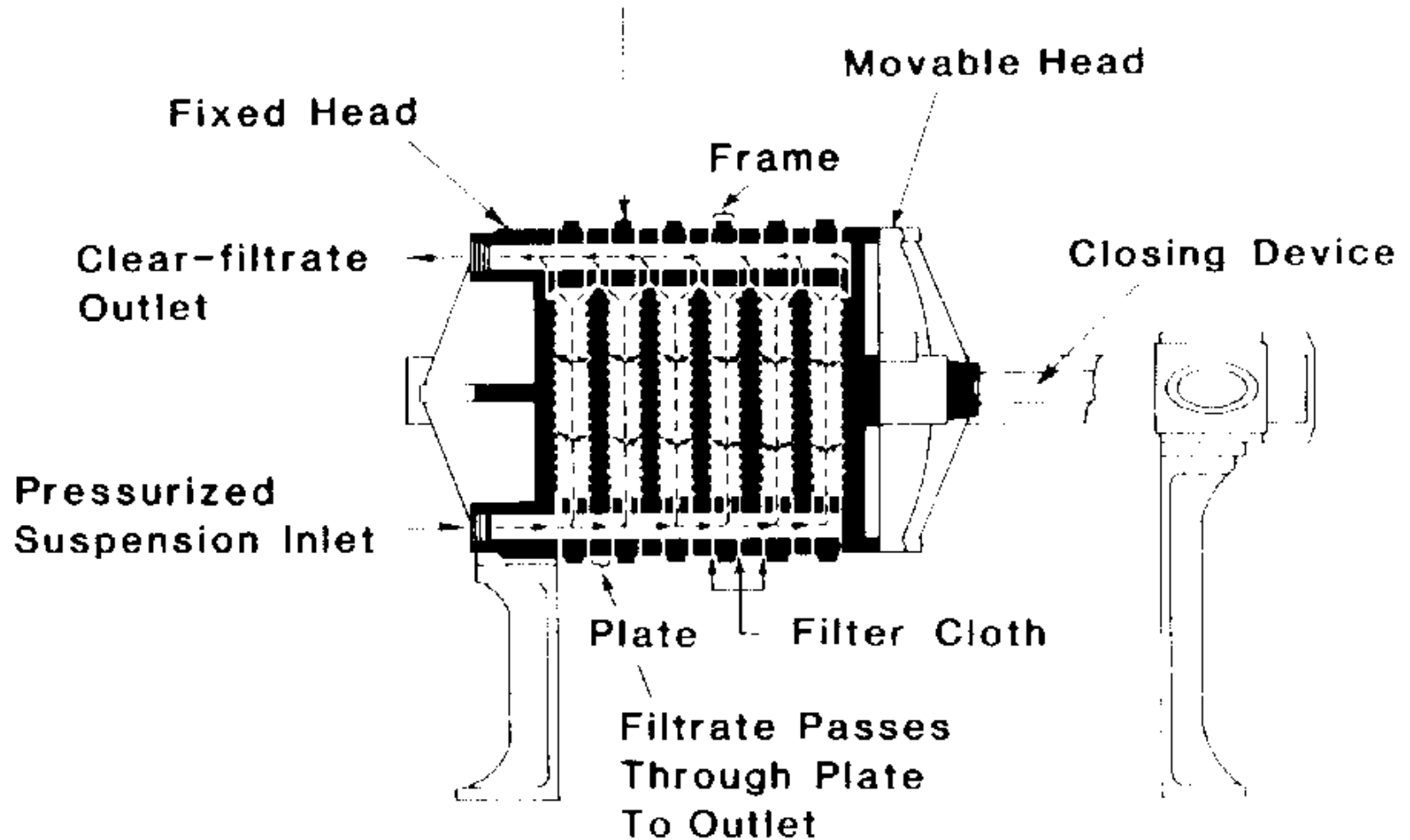
# Hidrociclone

[Reed, 1995:364]



# Filtro-prensa

Solids Collect In Frames



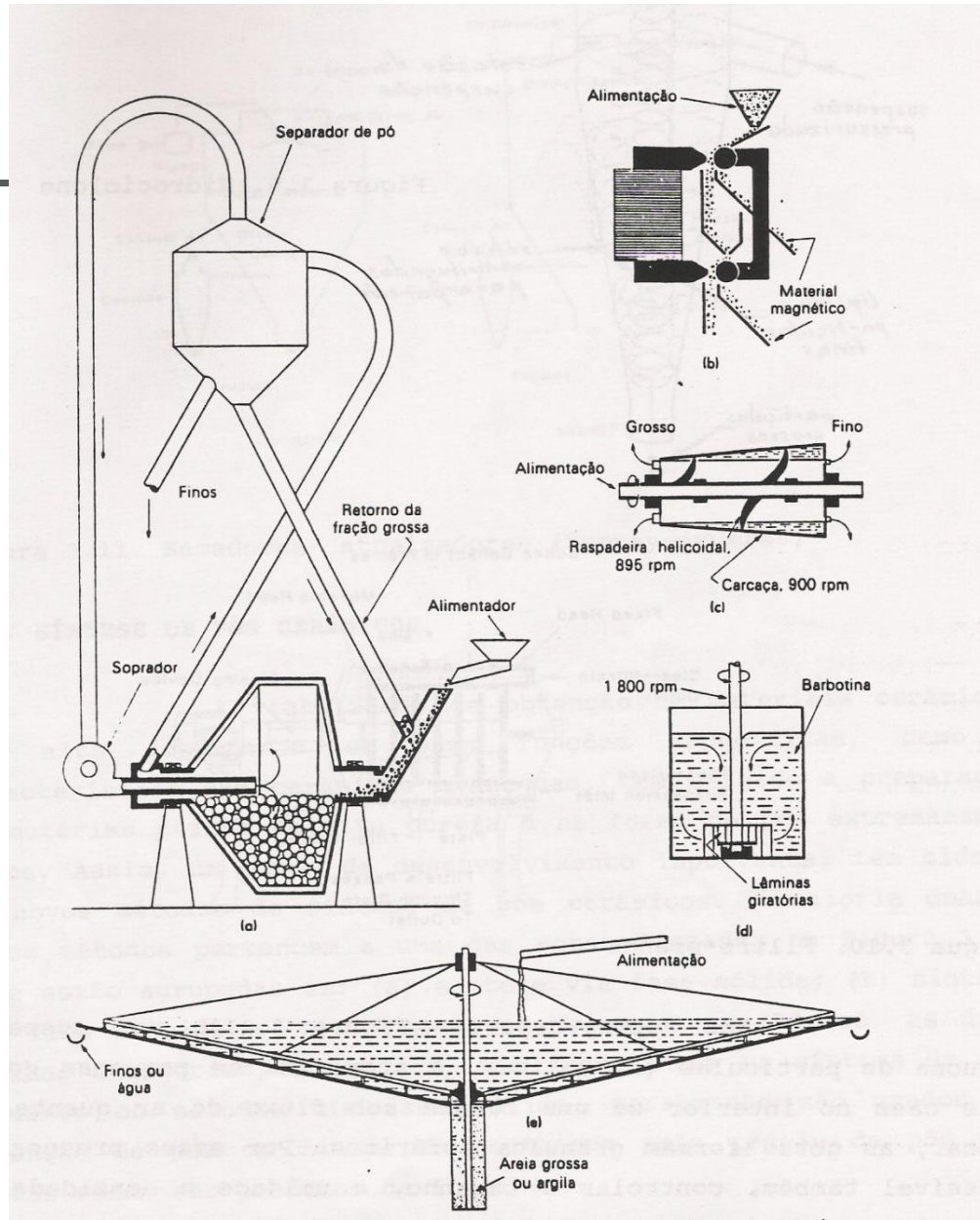
## ■ Classificação por sedimentação

Baseia-se na relação entre o diâmetro de partículas e a velocidade de sedimentação de um pó em um determinado fluido (lei de Stokes).

$$V = d^2 (\rho_p - \rho_l)g / 18\eta,$$

Onde  $v$  é a velocidade de sedimentação,  $d$  é o **diâmetro esférico equivalente**,  $\rho_p$  é a densidade do pó,  $\rho_l$  é a densidade do fluido e  $\eta$  é a viscosidade do fluido.

# Equipamentos





# . Filtração

---

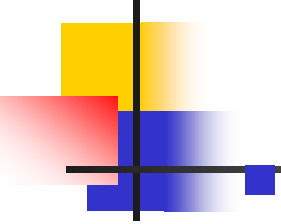
A filtração é um equipamento bastante utilizado para separação de partículas do líquido de suspensão, principalmente por ser mais barato, exigindo menor consumo de energia do que métodos de evaporação

# Filtro-prensa

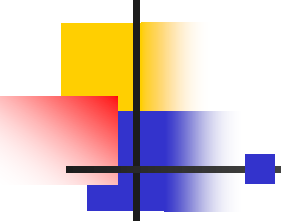


Grupo GAMESA, S.A. de C.V. Celaya Gto.

# 4. Secagem

- 
- Retirada de água e líquidos de matérias-primas em pó ou em aglomerados como as tortas do filtro-prensa.
  - Na maioria dos casos, a etapa de secagem está associada ao processo de granulação, caso da secagem por atomização (*spray-drying*).

# Spray-drier

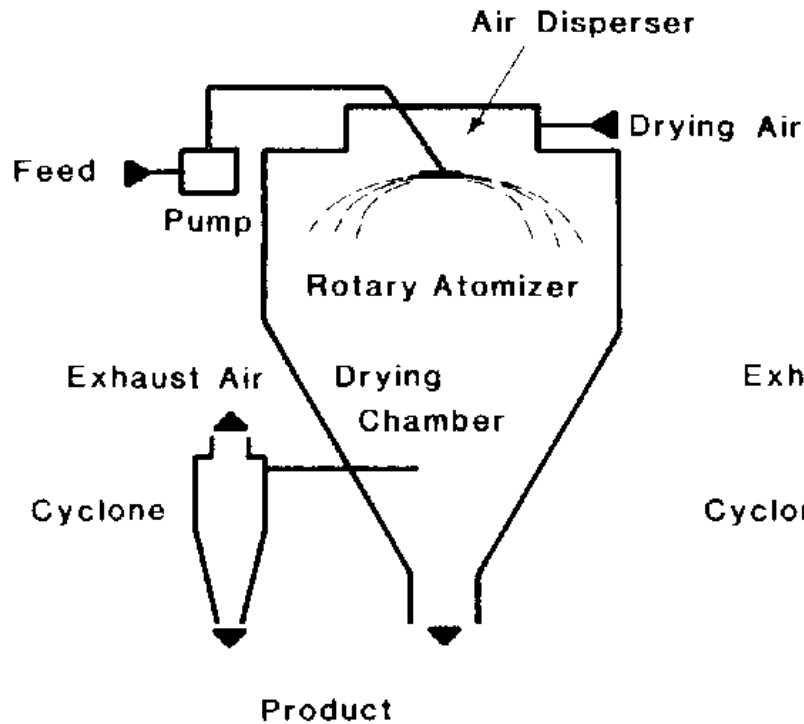


- Uma suspensão aquosa de partículas (barbotina), é atomizada em pequenas gotas que caem no interior de uma câmara sob fluxo de ar quente. Ao secar, as gotas formam grânulos esféricos. Nesse processo, é possível controlar o tamanho, umidade e densidade dos grânulos e ainda, adicionar quantidades controladas de ligantes e lubrificante

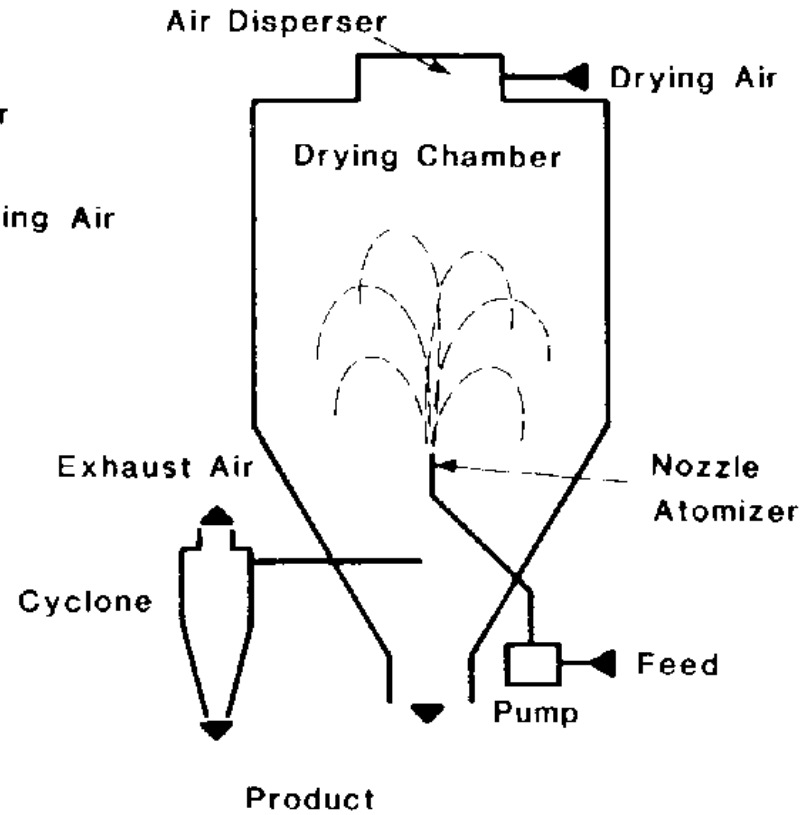


# Atomizadores

[Reed, 1995:382]



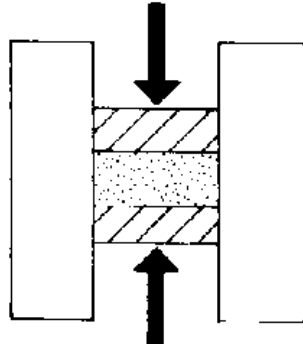
Co-current



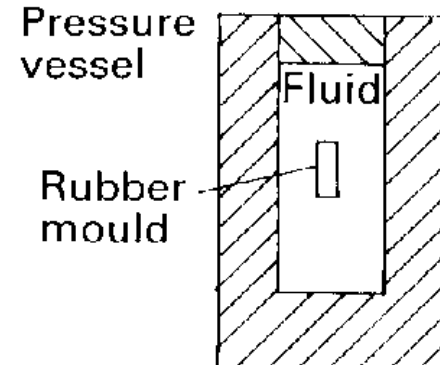
Mixed Flow

# Técnicas de conformação 1

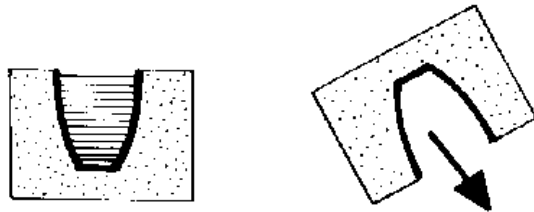
[Lee, 1994:29]



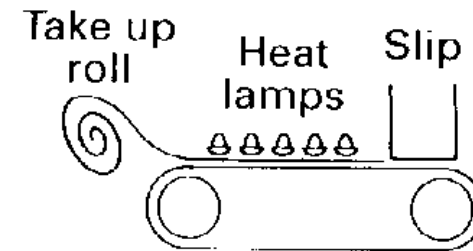
Prensagem uniaxial



Prensagem isostática



(c)  
Colagem de barbotina



(d)  
Colagem de folhas

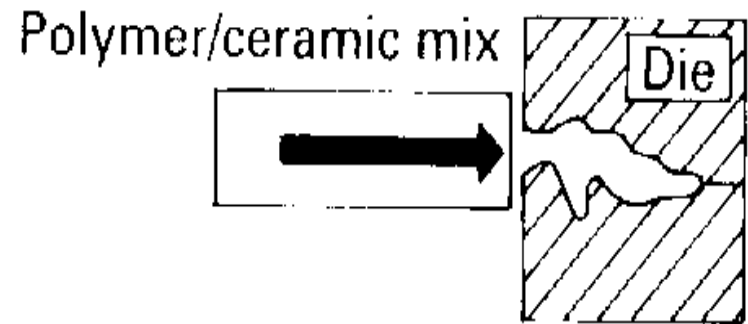
# Técnicas de conformação 2

[Lee, 1994:29]



(g)

**Extrusão**



(h)

**Moldagem por injeção**

# Processos de conformação: características

[Lee, 1994:30]

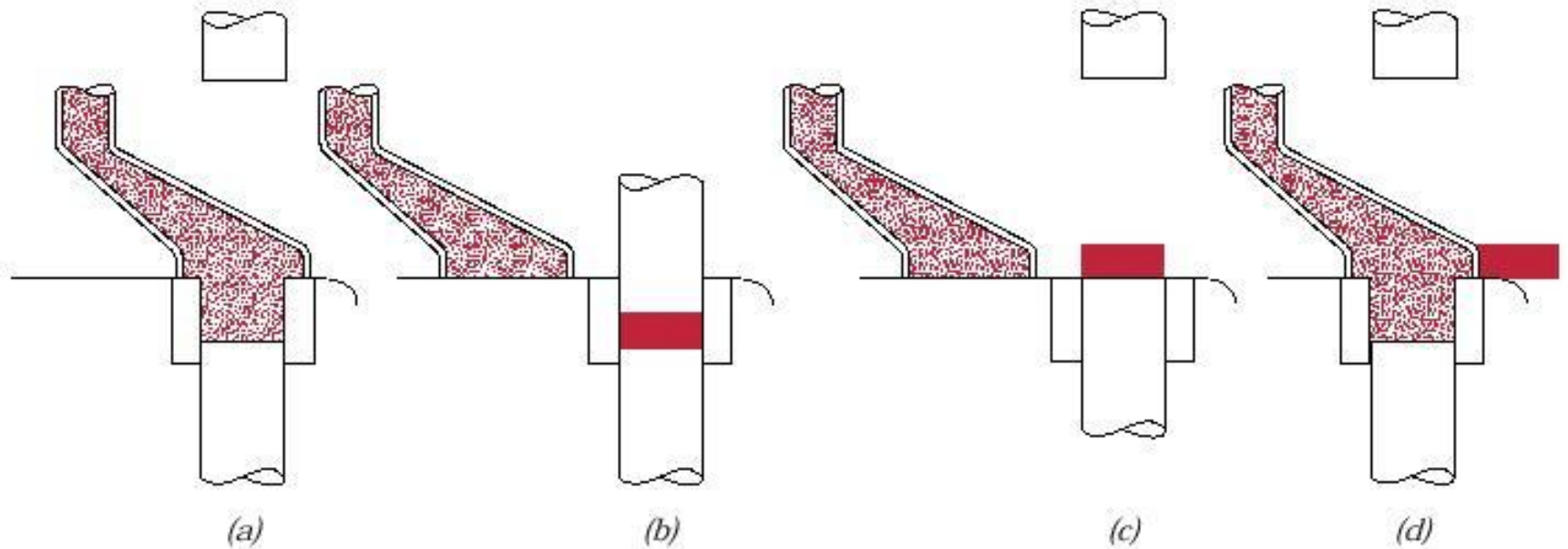
Técnica	Prensagem a seco	Prensagem isostática	Extrusão	Moldagem por injeção	Colagem de barbotina	Colagem de folhas
Material de partida	Grânulos	Grânulos	Pasta	Grânulos/pasta	Barbotina	Barbotina
Teor de umidade (m%)	0 – 5%	0 – 5%	18 – 25%		25 – 50%	25 – 50%
Formatos	Planos	Complexos	Simples	Complexos	Complexos	Planos
Automação	Sim	Batelada	Contínuo	Contínuo	Batelada	Contínuo
Orientação de partículas	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim



# 1. Prensagem

---

# Prensagem: alimentação, compactação e extração do molde



# Prensa hidráulica industrial



# Preparação da massa e aditivos de prensagem

## Objetivos

- Proporcionar uma mistura íntima e homogênea das matérias-primas
  - Adequar a massa para a etapa de prensagem
- 

## Exigências para a massa

- Elevada fluidez, para que durante a fase de preenchimento das cavidades do molde, a massa escoe rapidamente e preencha o molde de maneira homogênea e reprodutível.
- Elevada densidade de preenchimento, para que a quantidade de ar a ser expulsa durante a fase de compactação seja mínima.



# Massa

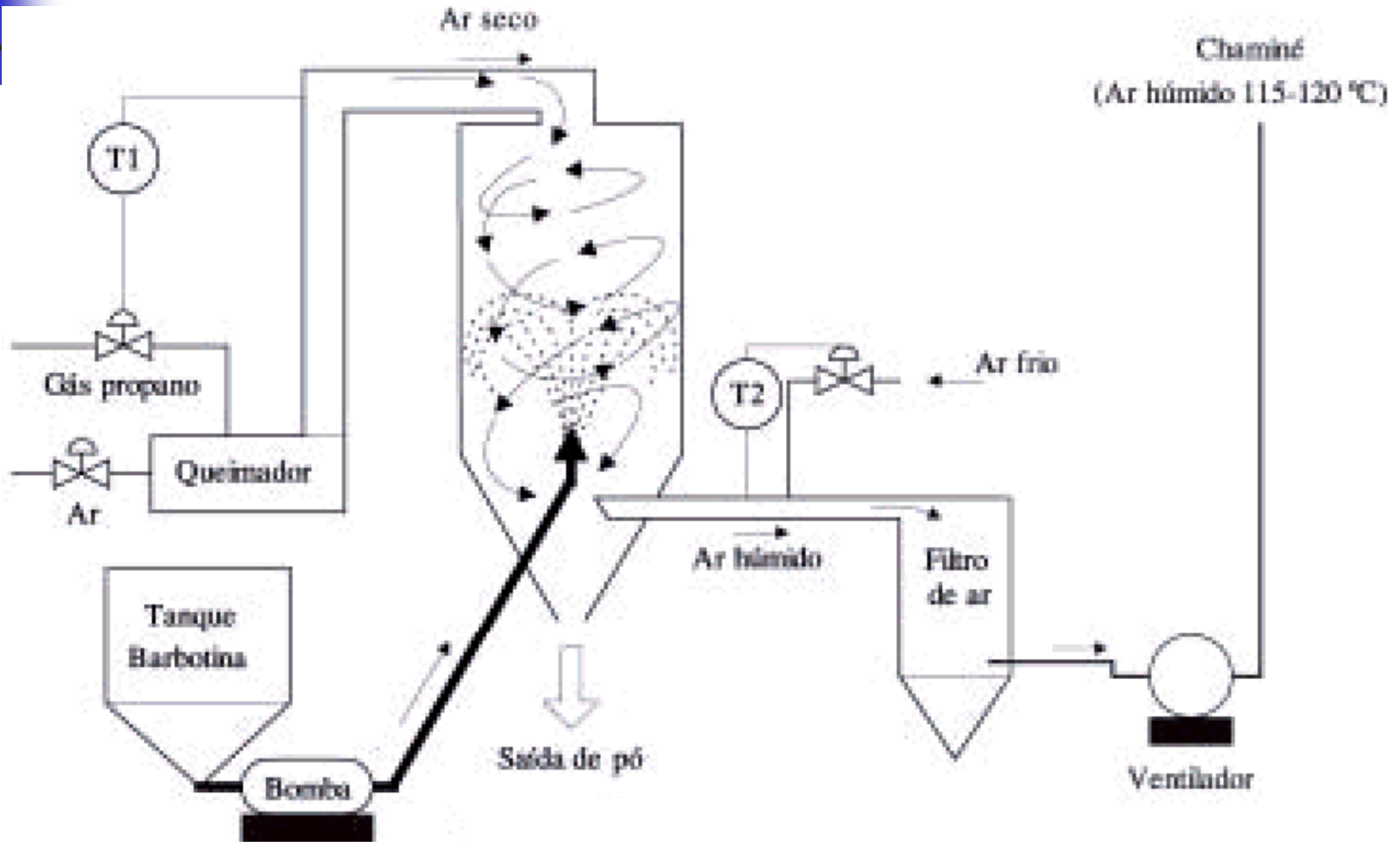
- ✓ A massa deverá ser constituída por grânulos de geometria esférica (ou aproximadamente esférica), de tamanho superior a 60  $\mu\text{m}$  e textura o mais lisa possível.
- ✓ As características mecânicas dos grânulos, tais como dureza, resistência mecânica e plasticidade devem ser adequadas.

## IMPORTANTE

- ✓ Os grânulos devem ser **suficientemente moles e deformáveis**, para que durante a fase de compactação, em pressões moderadas, se deformem plasticamente, facilitando o deslizamento das partículas que o compõe.
- ✓ Por outro lado, os grânulos **não podem ser tão frágeis, moles e deformáveis** a ponto de se romperem, deformarem ou aglomerarem uns aos outros durante as operações de armazenagem e transporte que antecedem a etapa de prensagem

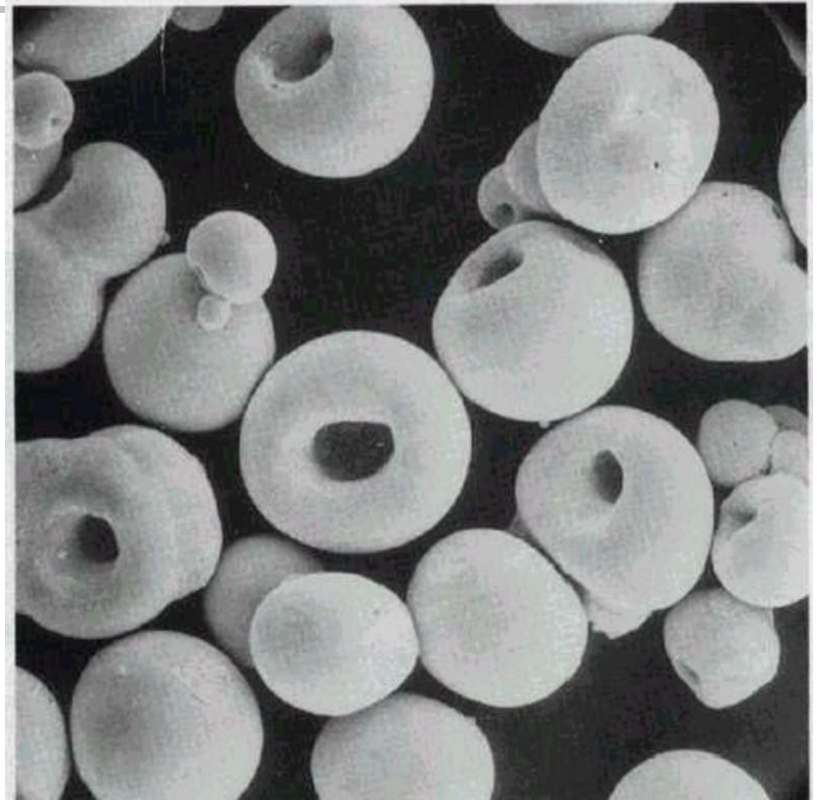
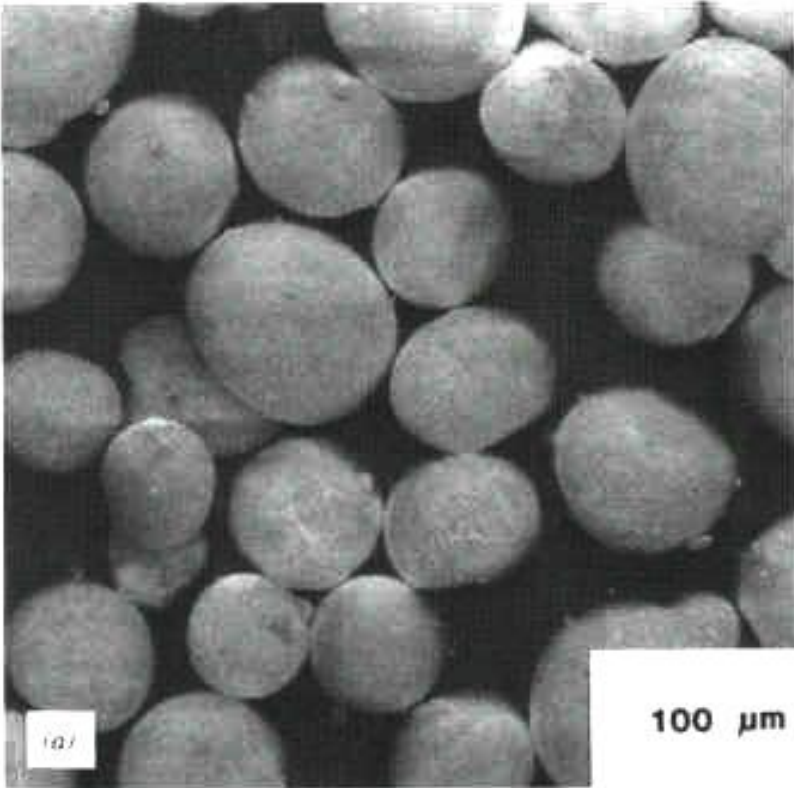
# Granulação - Spray Drier

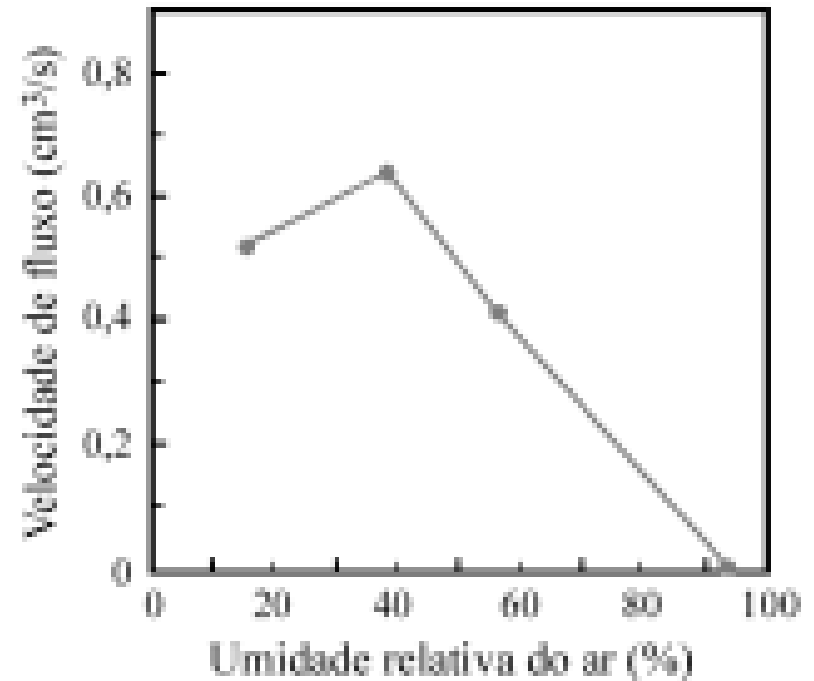
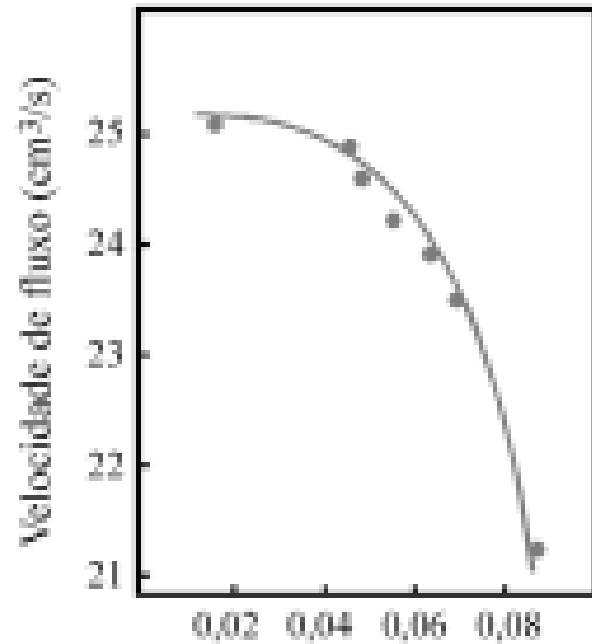
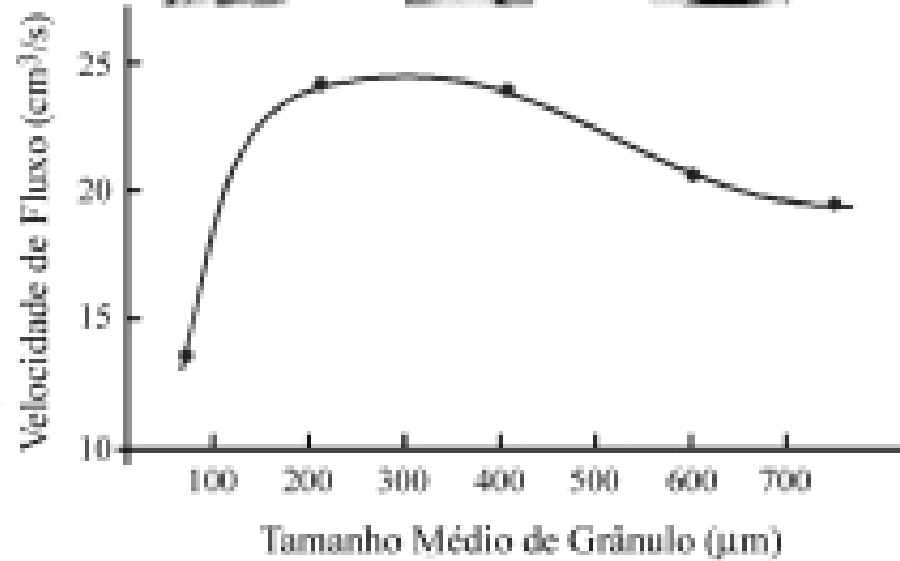
## Secagem por atomização



# Granulação

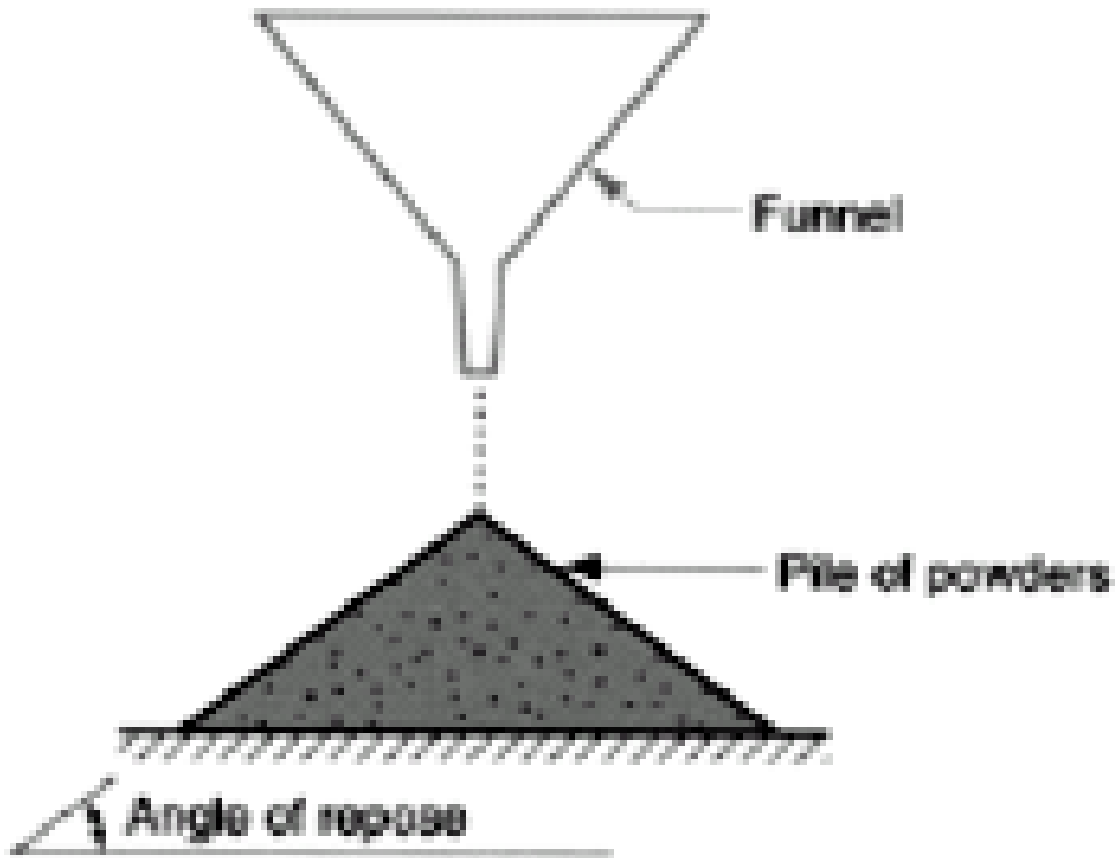
[Reed, 1995:388]





# Preenchimento

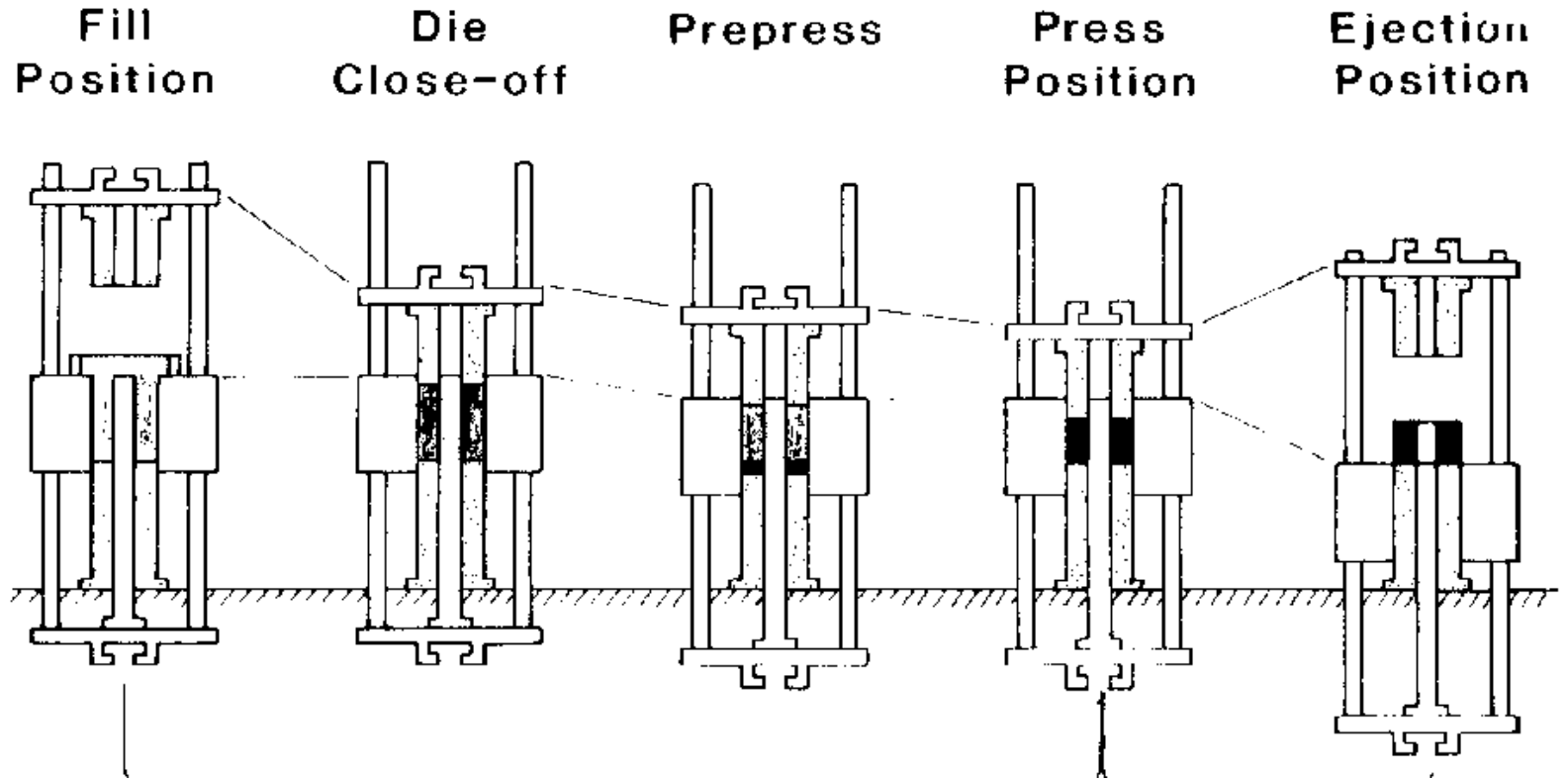
## Ângulo de Repouso



Ângulos de repouso pequenos favorecem um preenchimento regular do molde

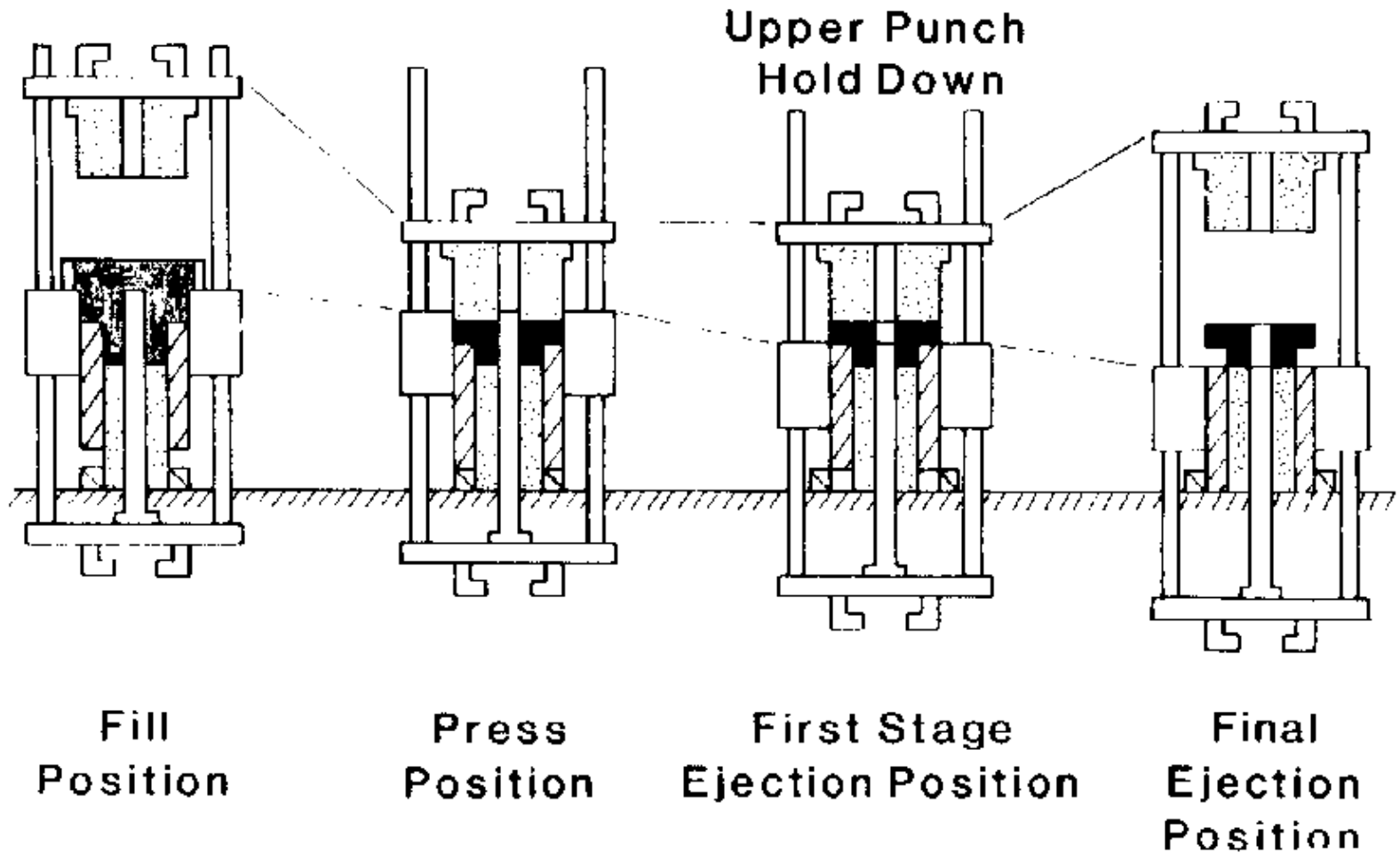
# Prensagem: simples efeito

[Reed, 1995:420]



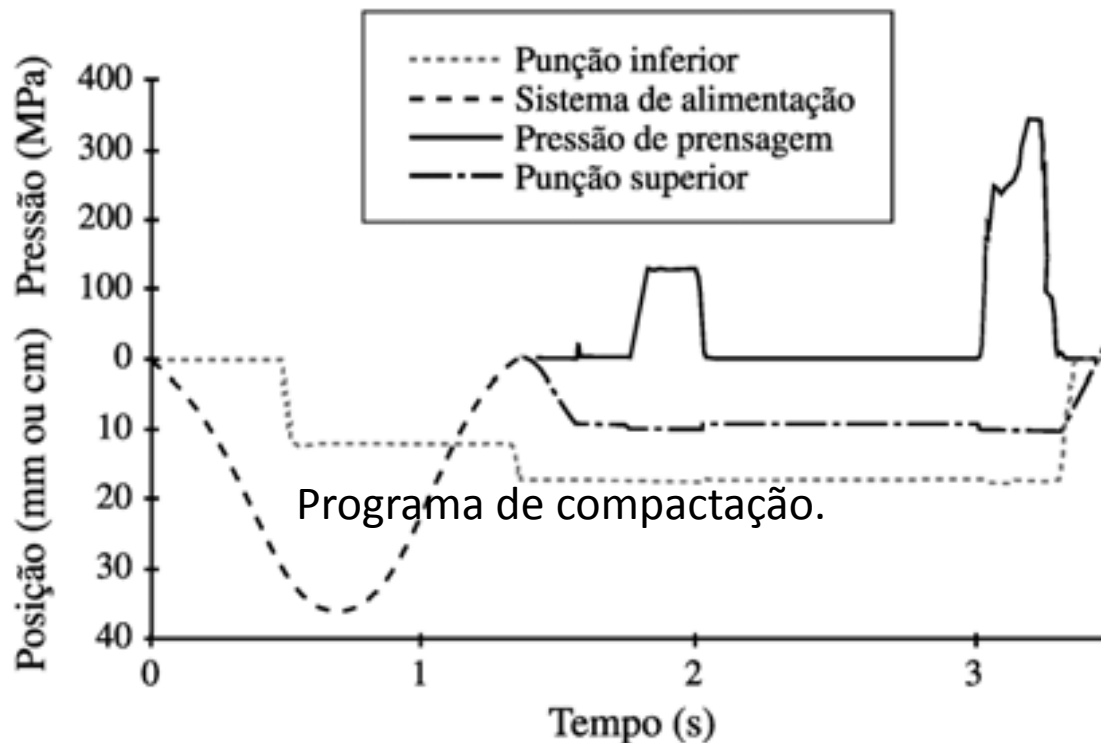
# Prensagem: duplo efeito

[Reed, 1995:420]

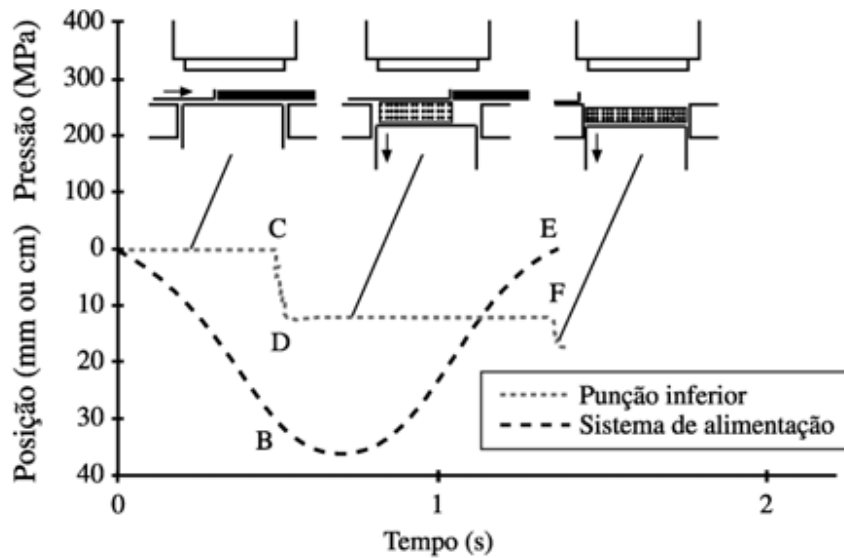


O ciclo de prensagem ou programa de compactação é constituído pelas seguintes etapas:

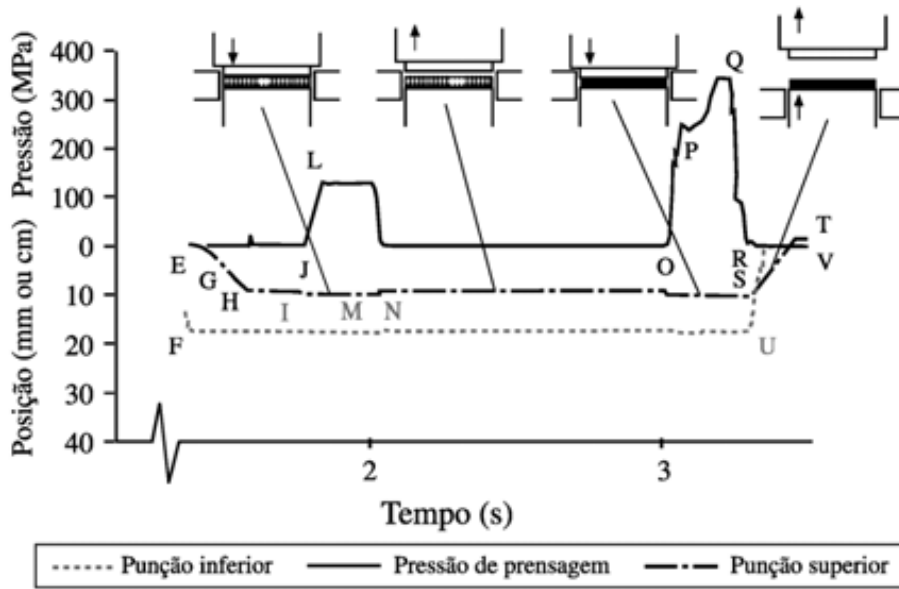
- preenchimento do molde
- ciclo da primeira prensagem
- período de desaeração
- ciclo da segunda prensagem, e
- extração da peça







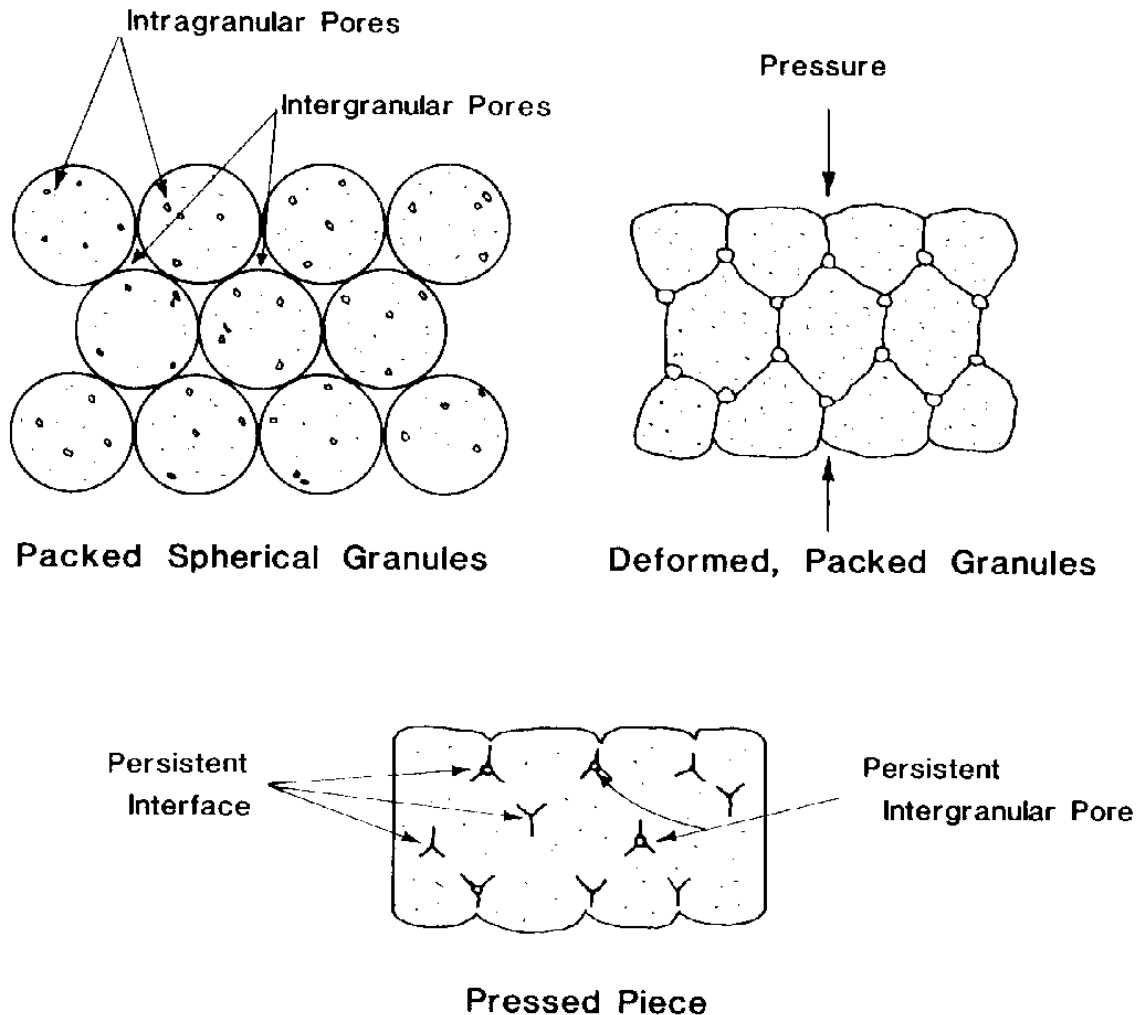
Programa de compactação. Preenchimento do molde.



Programa de compactação. Compactação/extração.

# Prensagem e porosidade: estágios da compactação

[Reed, 1995:428]



**I. Fluxo e reorganização espacial dos grânulos**

**II. Deformação dos grânulos**

**III. Densificação dos grânulos**



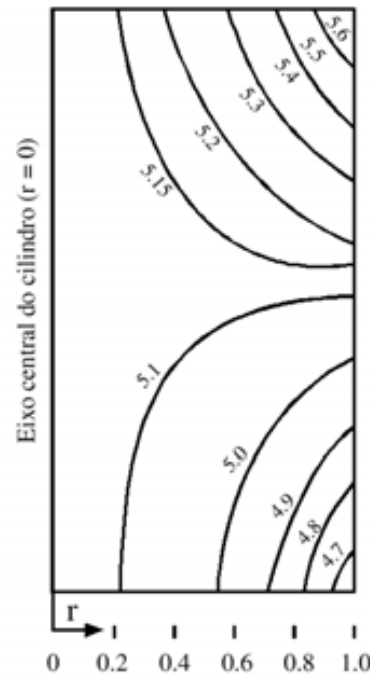
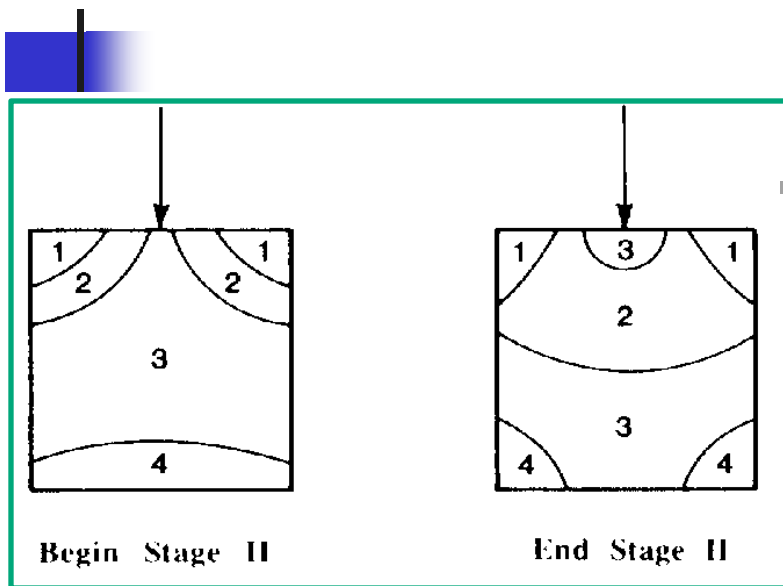
---

**O compacto deve resistir a: ejeção e manuseio**

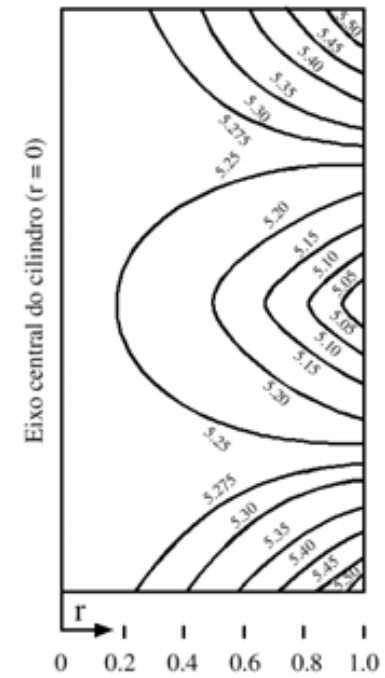
**Principais defeitos: densidade a verde diferencial ao longo da peça; trincas e laminações**

**Causas: recuperação elástica ("springback") diferencial no compacto**

# Defeitos e Problemas Associados à Prensagem Uniaxial



Coordenada radial adimensional ( $r/R$ )



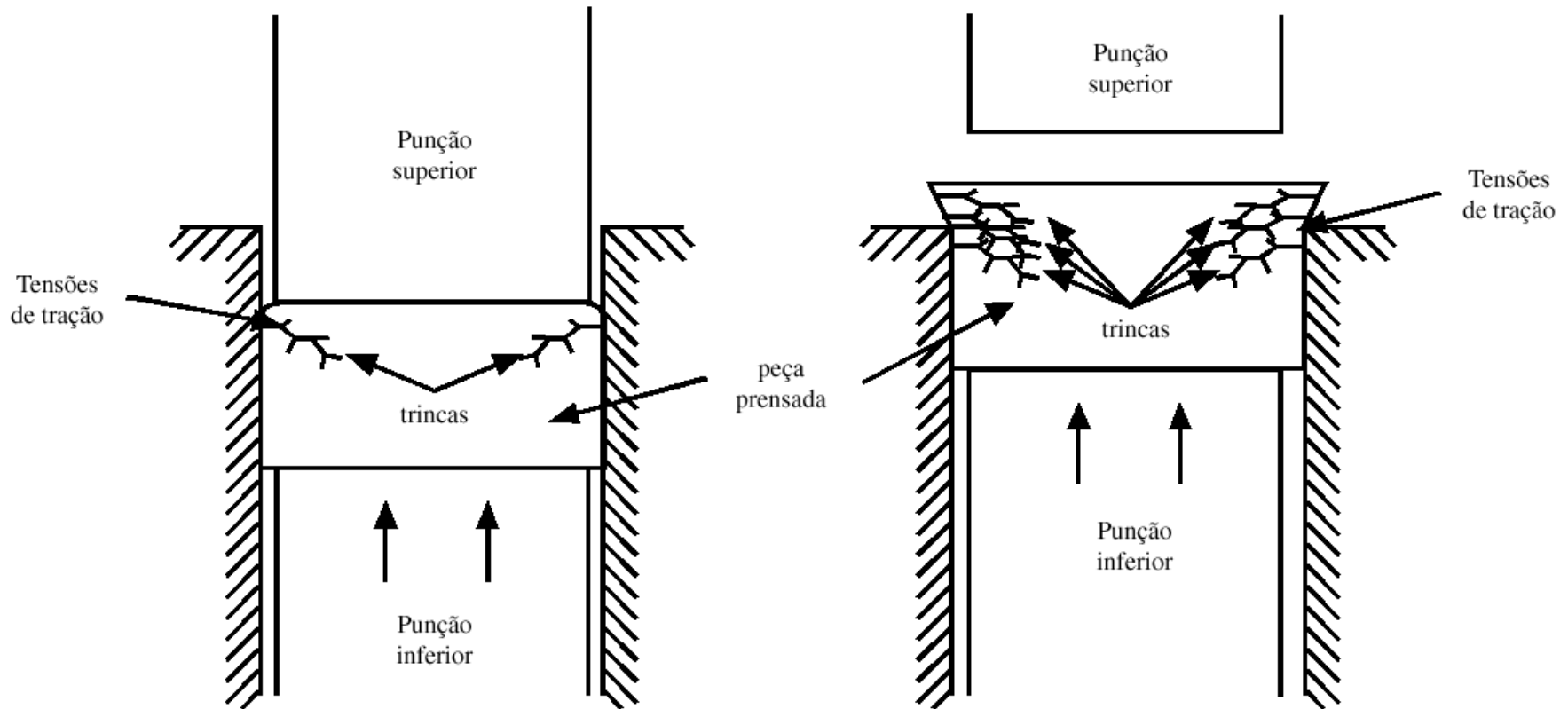
Coordenada radial adimensional ( $r/R$ )

Linhas de densidade aparente constante ( $\text{Kg/m}^3$ )  $\cdot 10^3$

Ação simples

Ação dupla

# Defeitos e Problemas Associados à Prensagem Uniaxial



(a) Formação de trincas durante a eliminação da carga;

(b) Formação de trincas durante a extração da peça;

**Mecanismos de formação de trincas. (a) Formação de trincas durante a eliminação da carga; (b) Formação de trincas durante a extração da peça.**

# Causas da recuperação elástica diferencial

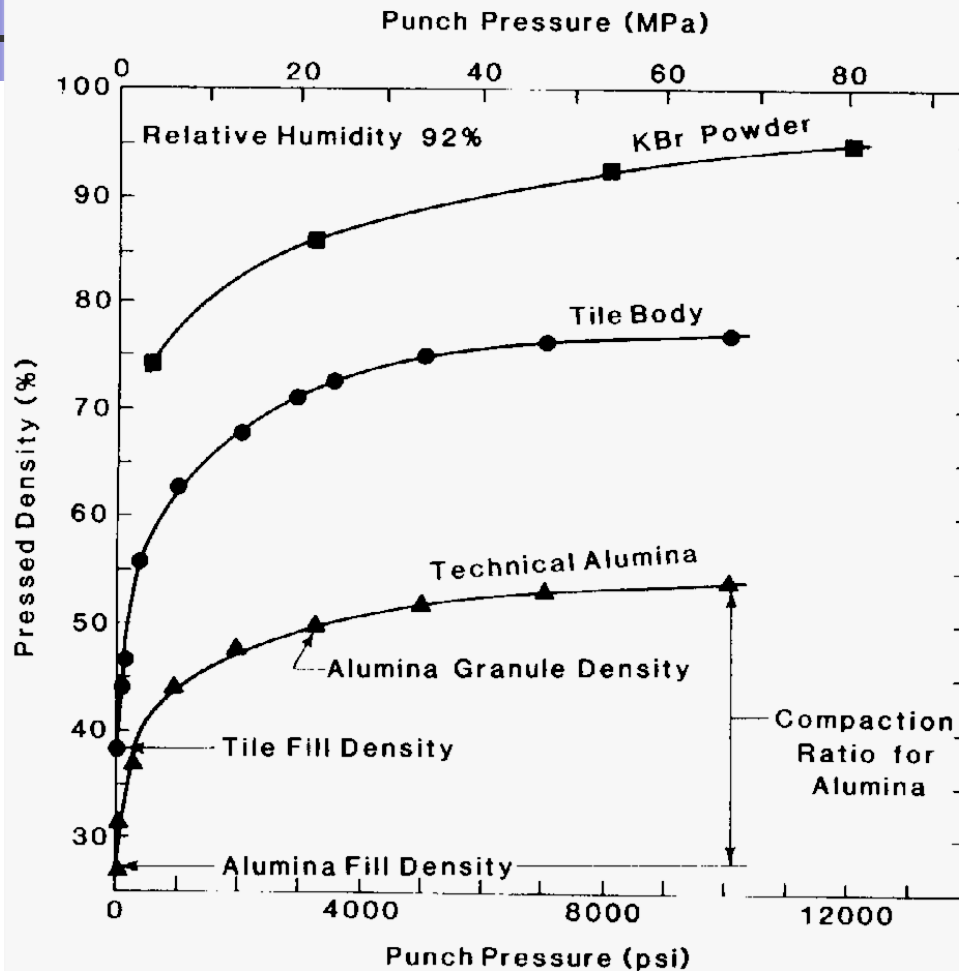
Recuperação elástica diferencial  tensões mecânicas

Causas:

- Gradientes de pressão
- Compressão não-uniforme do compacto devido a preenchimento irregular do molde, ar comprimido, etc.
- Atrito com a parede do molde durante a ejeção
- **Recuperação elástica da porção ejetada em relação à porção que ainda permanece no molde.**

# Comportamentos de compactação

[Reed, 1995:426]



$$\% \text{ P.D.} = D_c / D_t$$

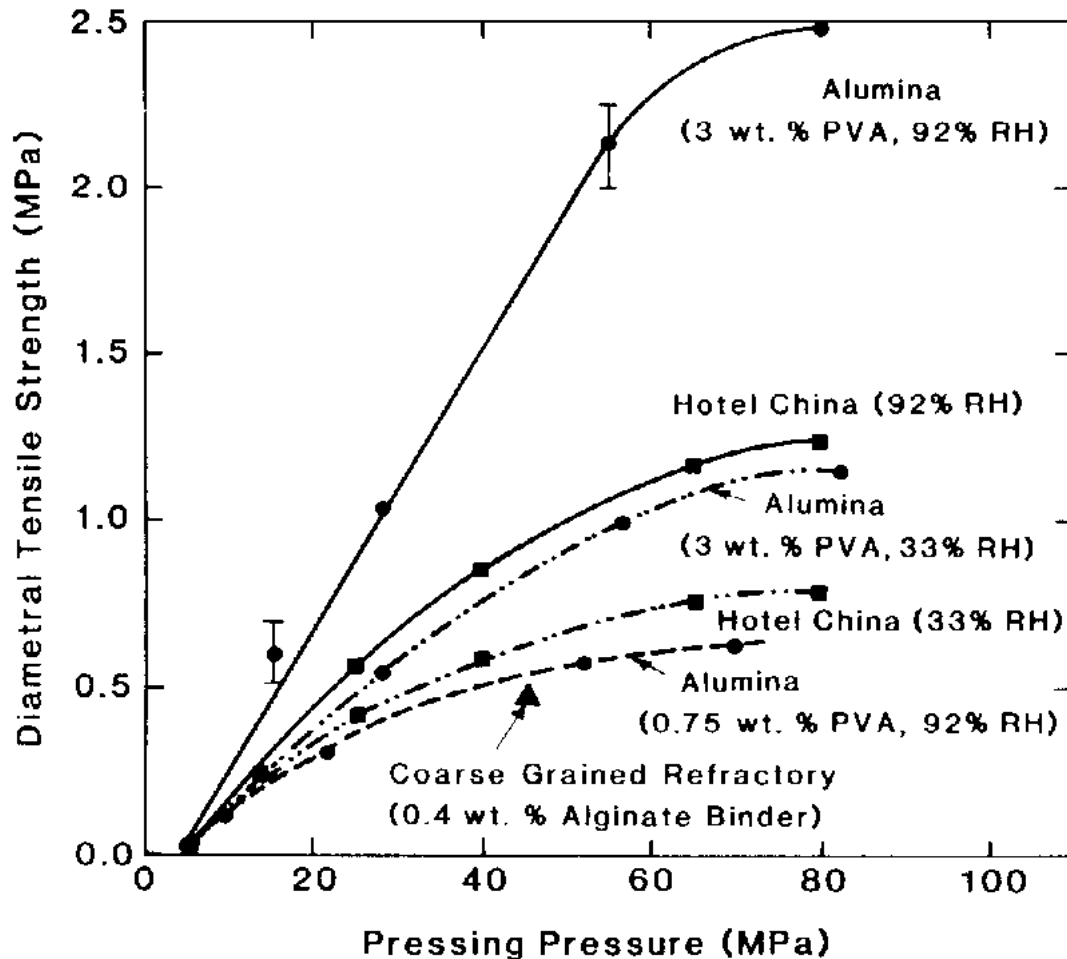
onde:

$D_c$  = densidade do compacto

$D_t$  - densidade teórica do pó

# Influência da pressão de compactação e plastificação

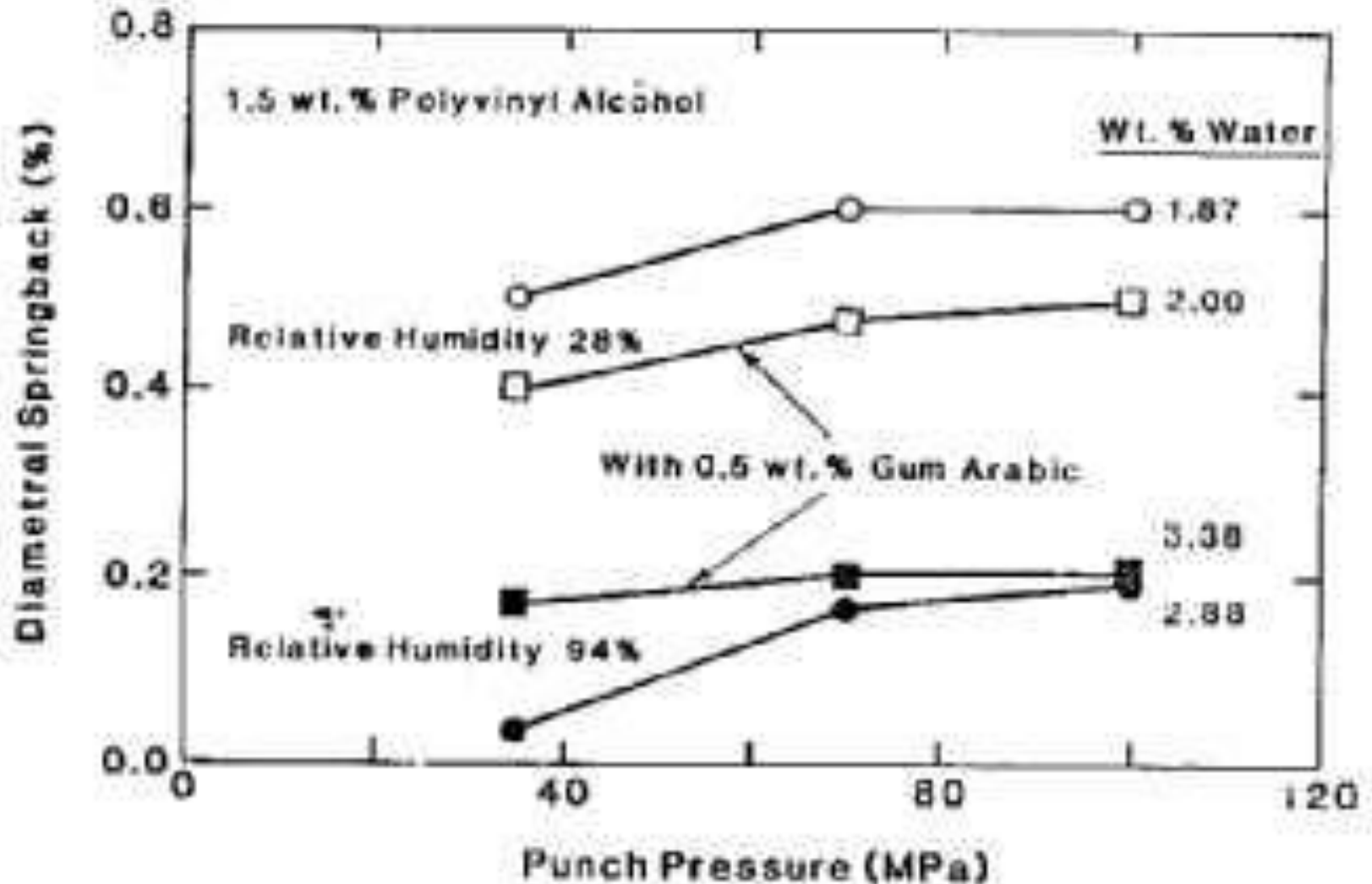
[Reed, 1995:436]



A resistência mecânica do compacto aumenta com a **pressão**, **teor de ligante e plastificante**; RH = umidade relativa (%)

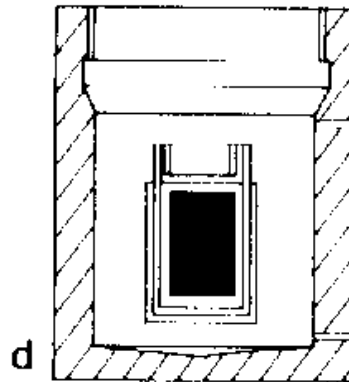
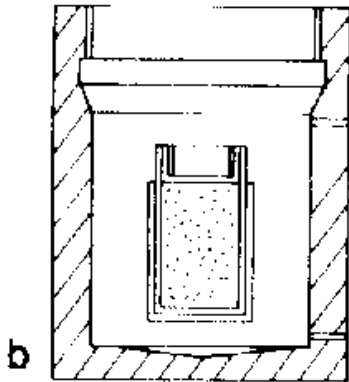
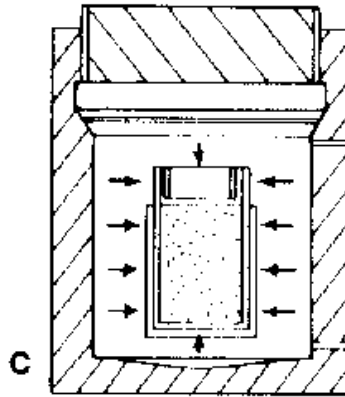
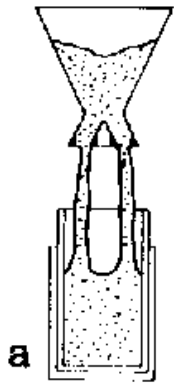


# Recuperação elástica em função da pressão aplicada e adição de plastificantes



# Prensagem isostática

Wet Bag



## Vantagens:

- ✓ Compactação homogênea
- ✓ Diversidade e complexidade de formas
- ✓ Baixo custo do molde

## Desvantagens:

- ✓ Duração do ciclo de prensagem
- ✓ Alto custo da mão-de-obra

# Peças produzidas por prensagem isostática

Rods and  
Tubes up  
to 425mm  
long



Mill Balls  
And Hip  
Joints

Engine  
Valves for  
car engines



Some part  
tooling and  
moulding  
bags

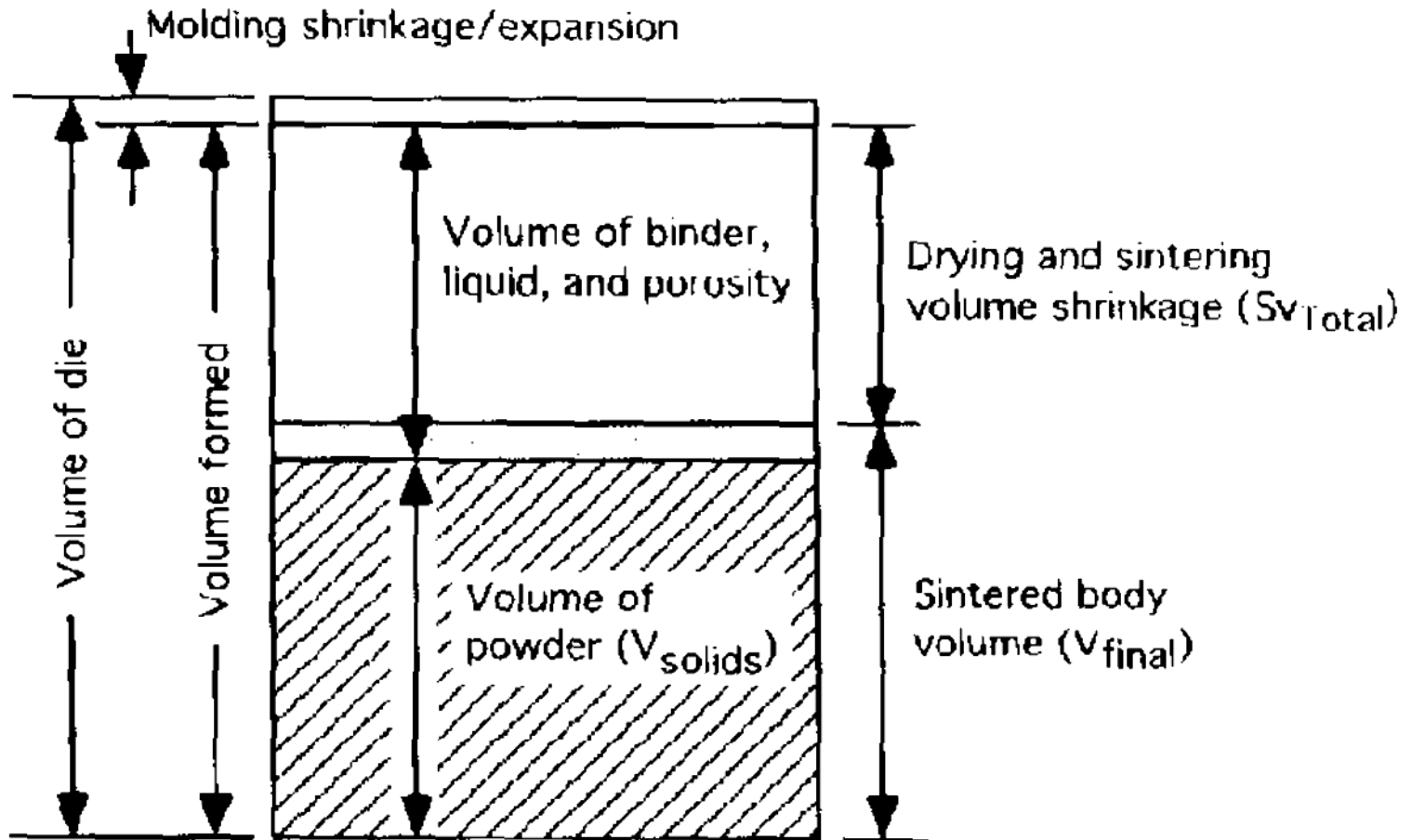


Light  
Filaments



# Variação dimensional durante processamento

[Reed, 1995:412]



## 2.Processos de conformação fluida:

### Colagem de barbotina (slip casting)

---

- Conformação fluida de suspensões contendo um agente de pega hidráulica (cimento) ou um agente gelificante (“gelcasting”)
- Concretos refratários: auto-escoantes, bombeáveis, jateáveis, vibráveis, etc.

# Vantagens x Desvantagens

## **Vantagens:**

✓ **Completa dispersão dos pós em meio líquido**

✓ **Capacidade de produzir peças com formas complexas**

✓ **Baixo custo**

## **Desvantagens:**

✓ **Baixa produtividade**

✓ **Precisão dimensional difícil de ser controlada**

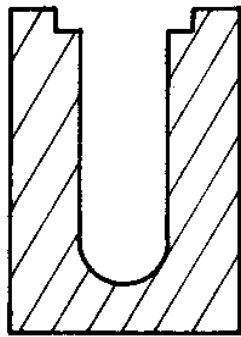


## **2.Colagem de barbotina**

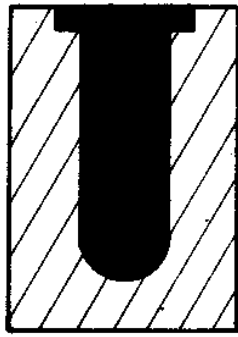
---

# Colagem de barbotina

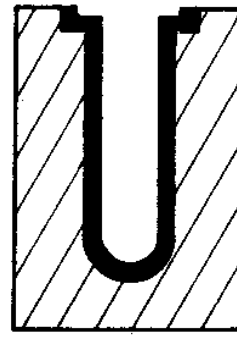
[Reed, 1995:493]



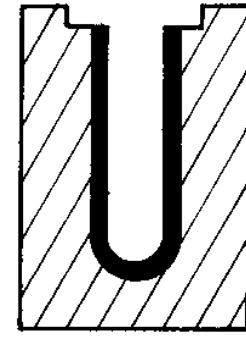
a)



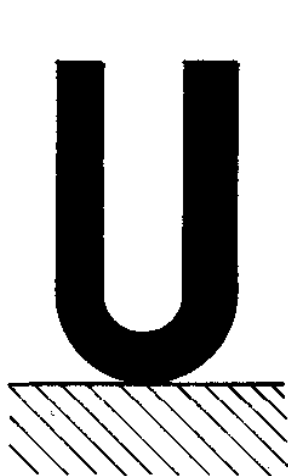
b)



c)



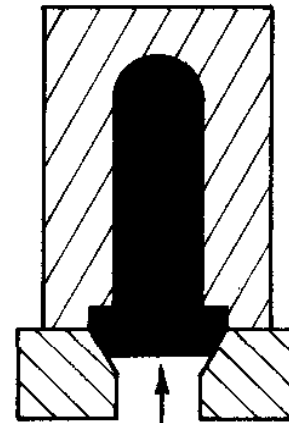
d)



e)



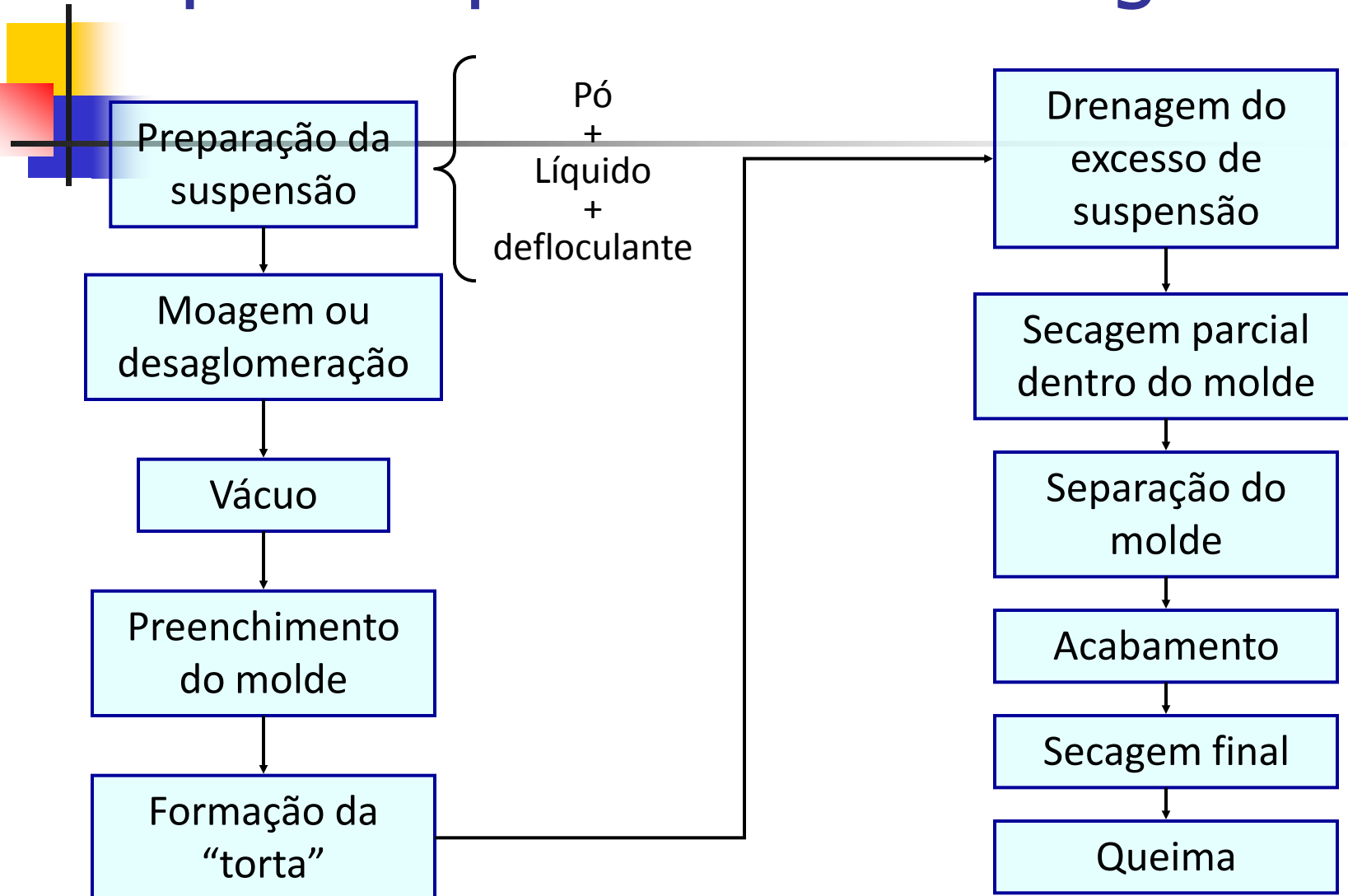
f)



g)



# Etapas do processo de colagem



# Processos de conformação: características

[Lee, 1994:30]

Técnica	Prensagem a seco	Prensagem isostática	Extrusão	Moldagem por injeção	Colagem de barbotina	Colagem de folhas
Material de partida	Grânulos	Grânulos	Pasta	Grânulos/pasta	Barbotina	Barbotina
Teor de umidade (m%)	0 – 5%	0 – 5%	18 – 25%		25 – 50%	25 – 50%
Formatos	Planos	Complexos	Simples	Complexos	Complexos	Planos
Automação	Sim	Batelada	Contínuo	Contínuo	Batelada	Contínuo
Orientação de partículas	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim

# Processos de conformação: quadro comparativo 2

[Reed, 1995:399]

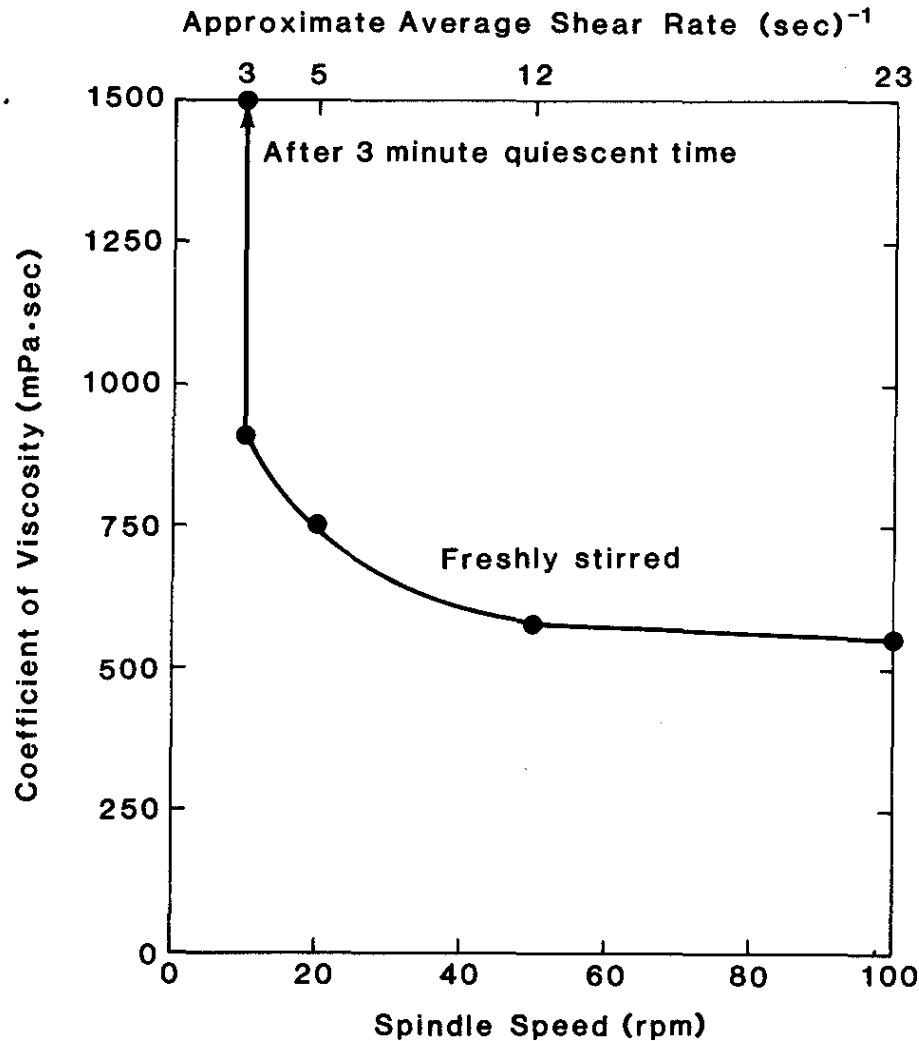
Processo	Molde	Características	Produtos
Colagem de barbotina	Gesso/polímero poroso	Variedade de formas, facilidade de instalação, mecanização disponível	Refratários, tubos fechados, produtos avançados/tradicionais
Colagem de folhas	Lâmina metálica	Produção em massa	Substratos finos
Colagem de gel	Molde metálico/polimérico	Formas complexas, boa dispersão de pós, densidade uniforme	Produtos estruturais avançados, isolamento, refratários
Ligação por reação	Vários materiais	Formas complexas, tamanhos grandes/pequenos	Concreto, refratários, isolamento, restaurações dentárias

# Pressões e taxas de cisalhamento na conformação

[Reed, 1995:403]

Processo	Variante	Pressão (MPa)	Taxa de cisalhamento ( $s^{-1}$ )
Prensagem	Rolos/isostática	>150	
	Axial	<100	
Confor- mação plástica	Injeção	Varia	10–10000
	Extrusão	<40	10–10000
Colagem de barbotina	Sucção no molde	<0,2	<10
	Sob pressão	<10	<100
	Vácuo no molde	<0,7	<10
Colagem	Gel	<0,1	<10
	Folha	<0,1	10–2000

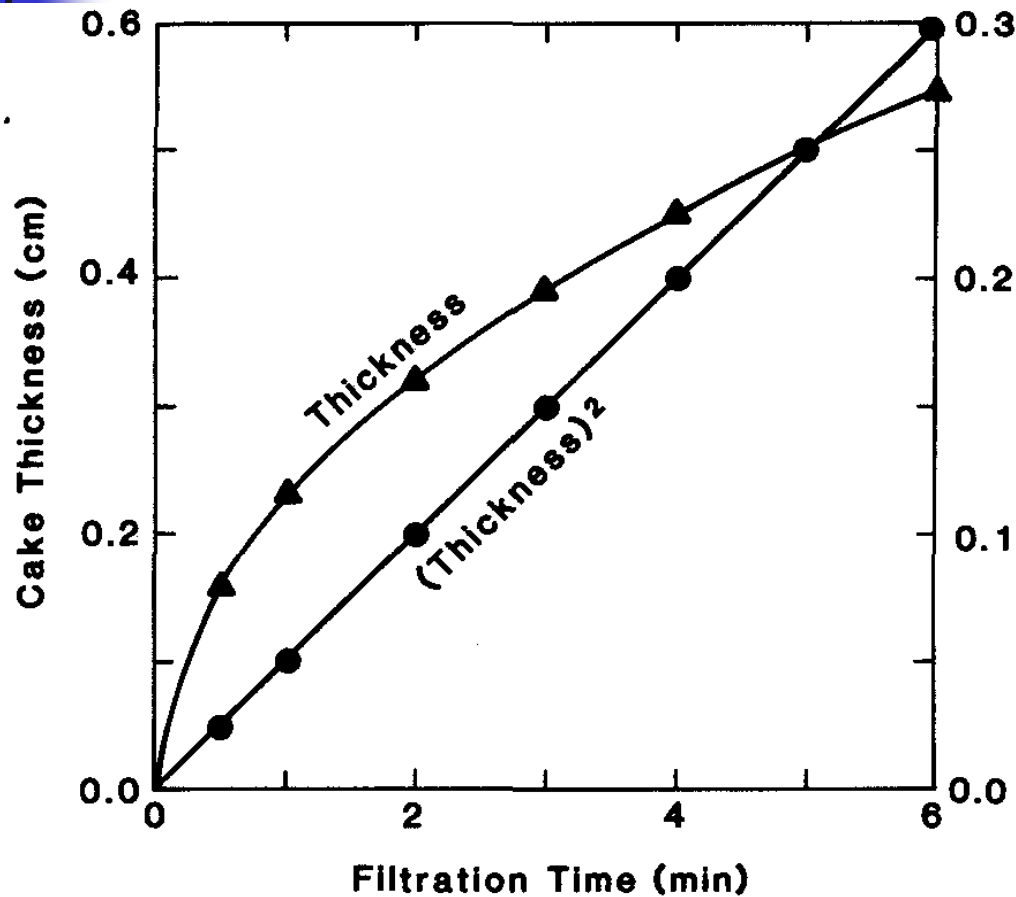
# Comportamento reológico da suspensão: tixotrópico



1. Preenchimento de detalhes do molde
2. Bombeamento da suspensão
3. Eliminação de bolhas
4. Minimização da sedimentação durante a formação da torta

# Espessura da torta x tempo

[Reed, 1995:498]



$$L = \left( \frac{2J \cdot \Delta P \cdot t}{\eta R_c} \right)^{0.5}$$

$J = V_{\text{torta}} / V_{\text{líqu. Remov.}}$

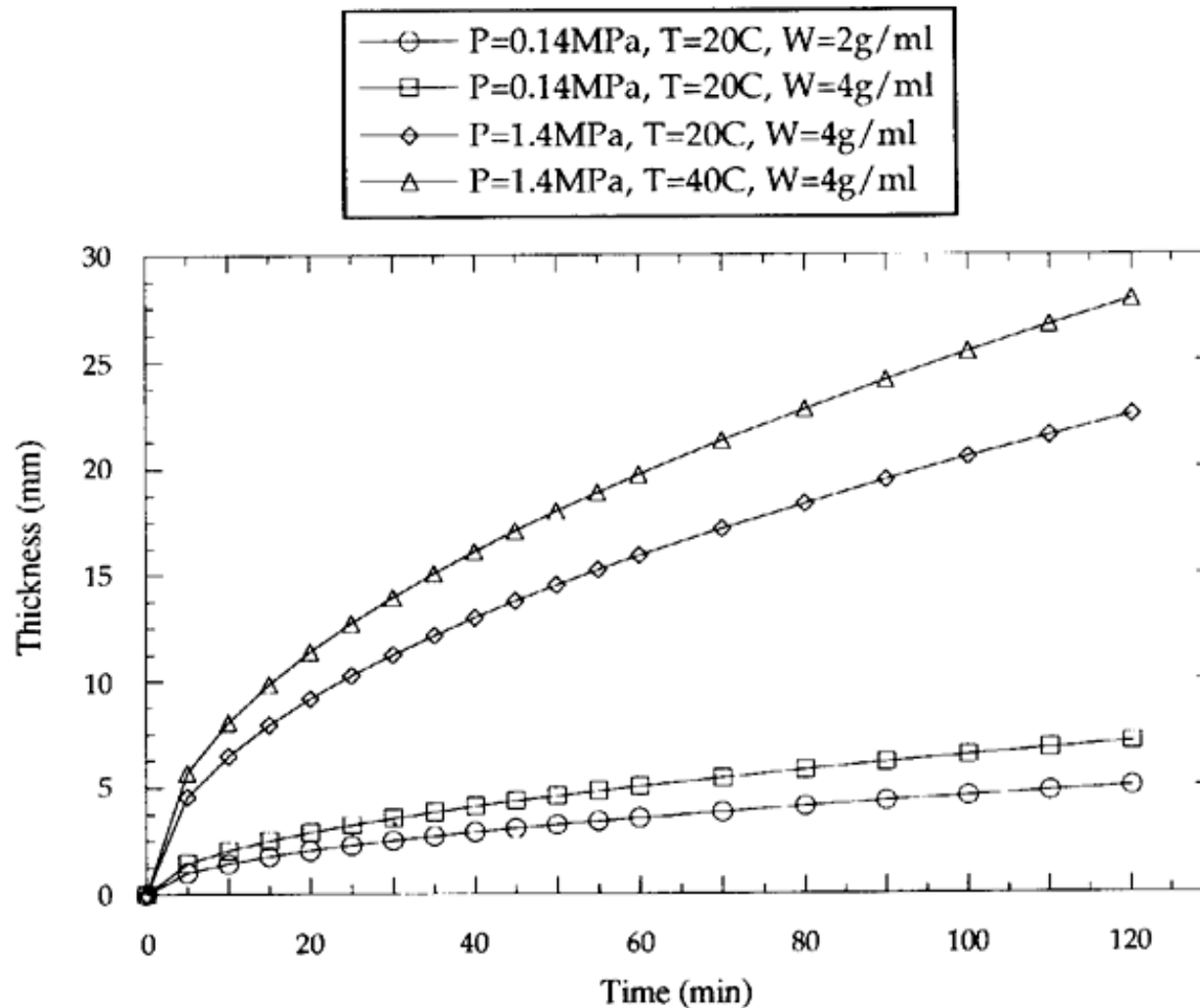
$R_c$  = permeabilidade da torta

$\Delta P$  = pressão de sucção do molde

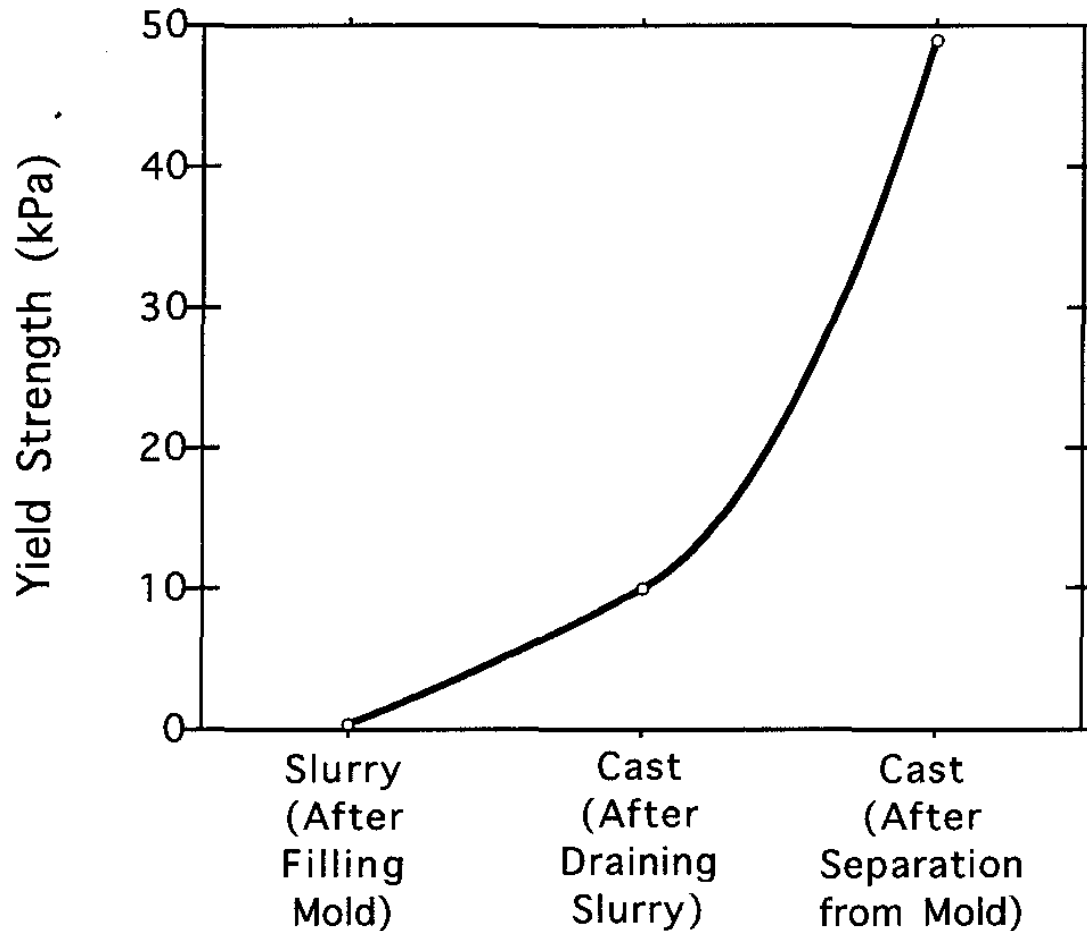
$\eta$  = viscosidade do líquido

# Efeitos de pressão, temperatura e teor de sólidos

[Reed, 1995:499]



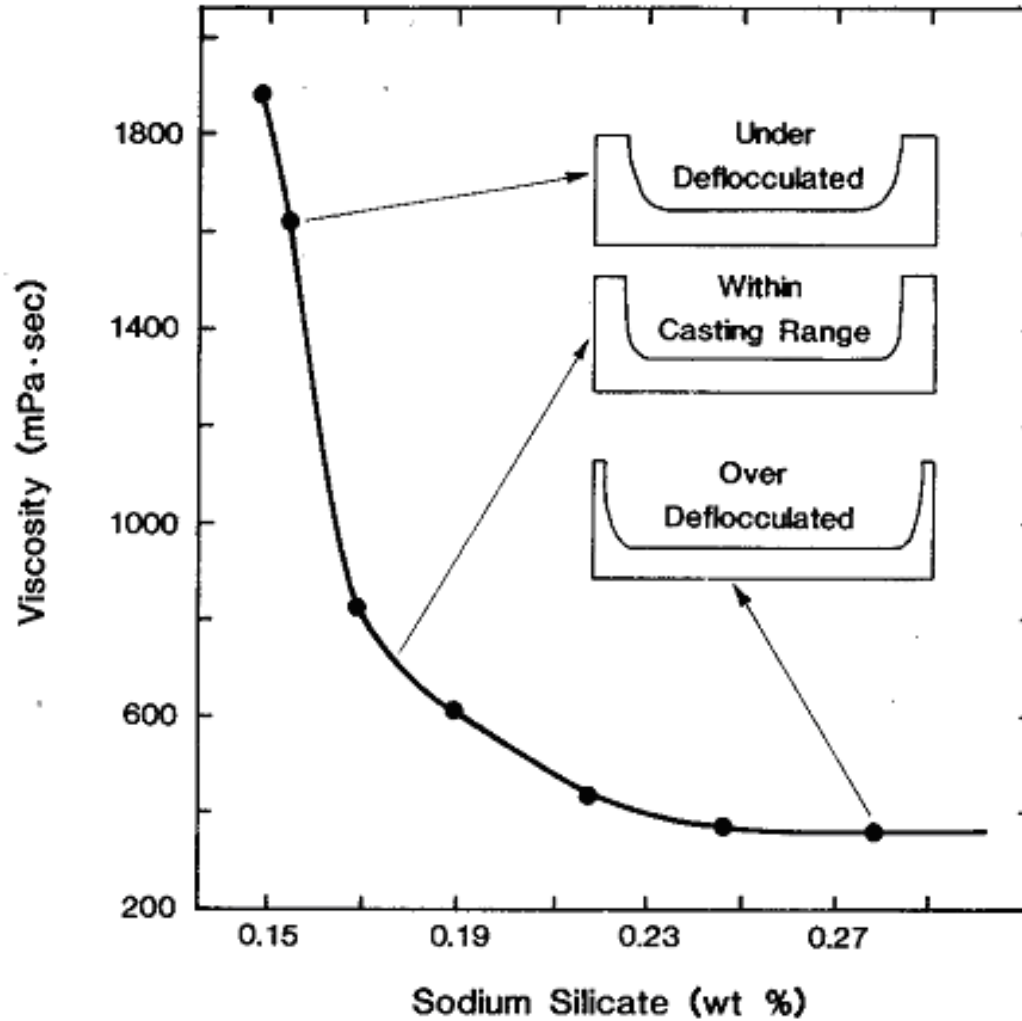
# Tensão de escoamento em cada etapa do processo de colagem





# Efeito do defloculante

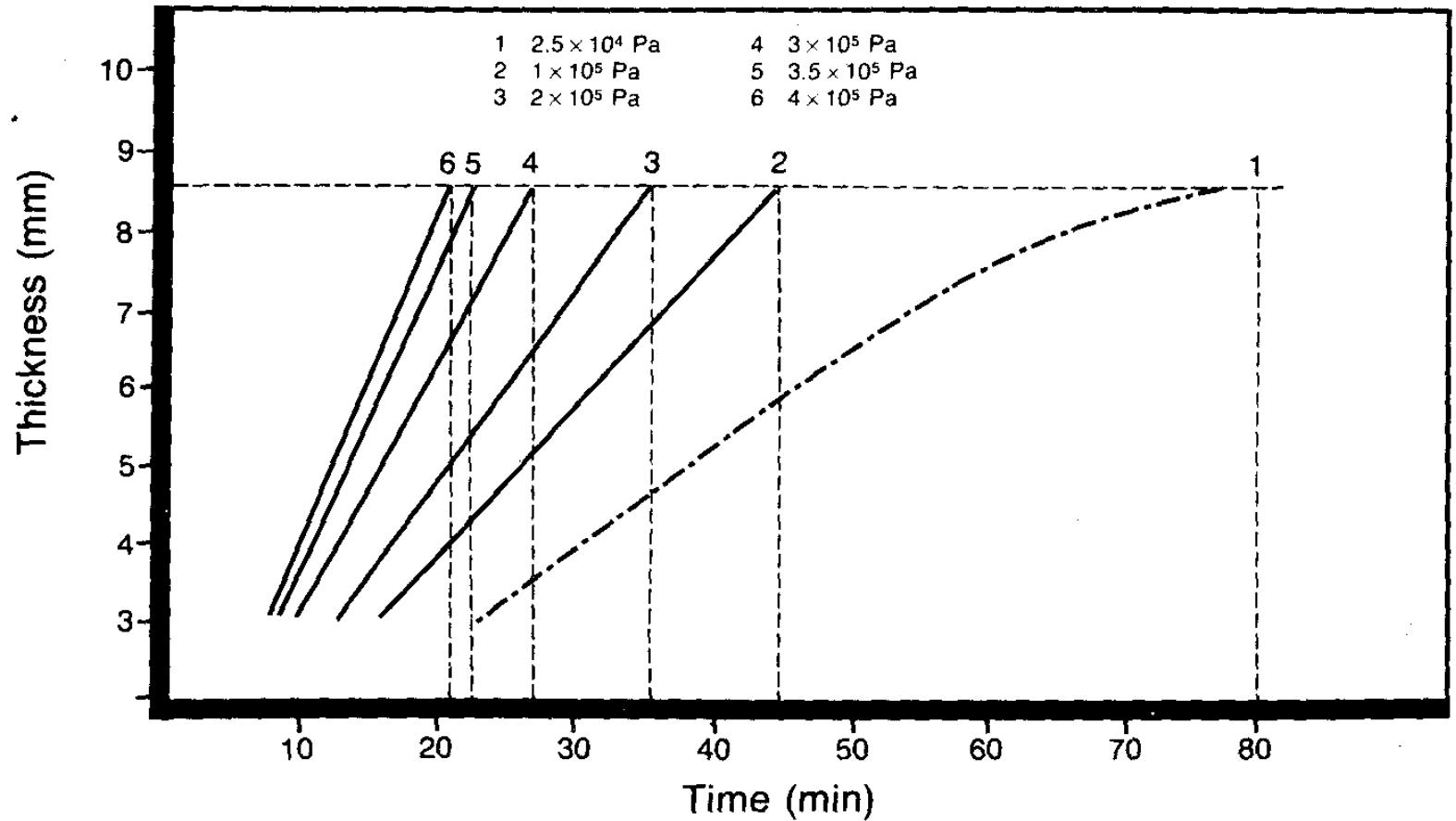
[Reed, 1995:501]



# Colagem sob pressão



# Colagem sob pressão






# **3. Conformação plástica**

## **EXTRUSÃO E INJEÇÃO**

---

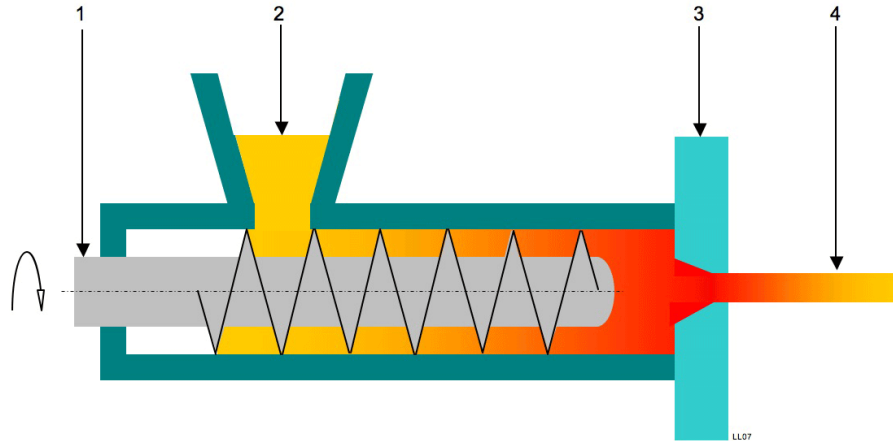
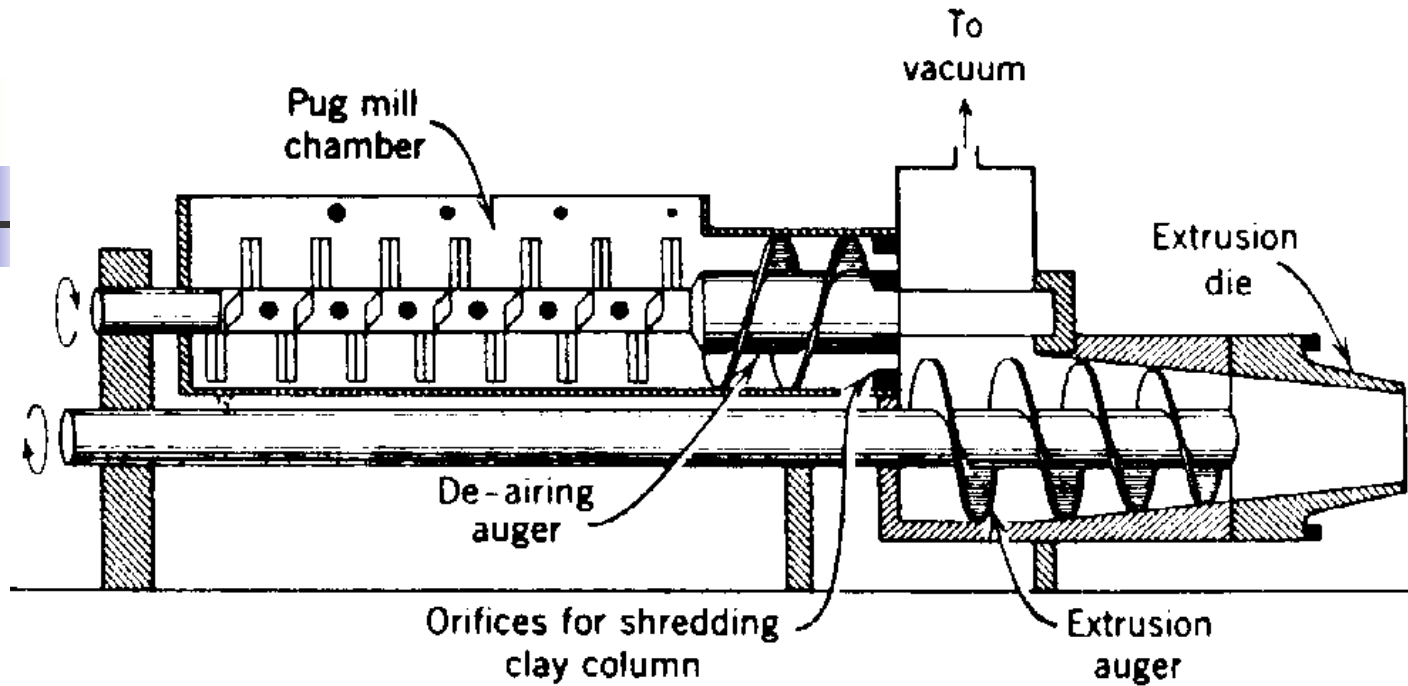
# Extrusão



A massa plástica é colocada numa extrusora, também conhecida como maromba, onde é compactada e forçada por um pistão ou eixo helicoidal, através de bocal com determinado formato. Como resultado obtém-se uma coluna extrudada, com seção transversal com o formato e dimensões desejados; em seguida, essa coluna é cortada, obtendo-se desse modo peças como tijolos vazados, blocos, tubos e outros produtos de formato regular

# Extrusora: ilustração esquemática

[Reed, 1995:452]

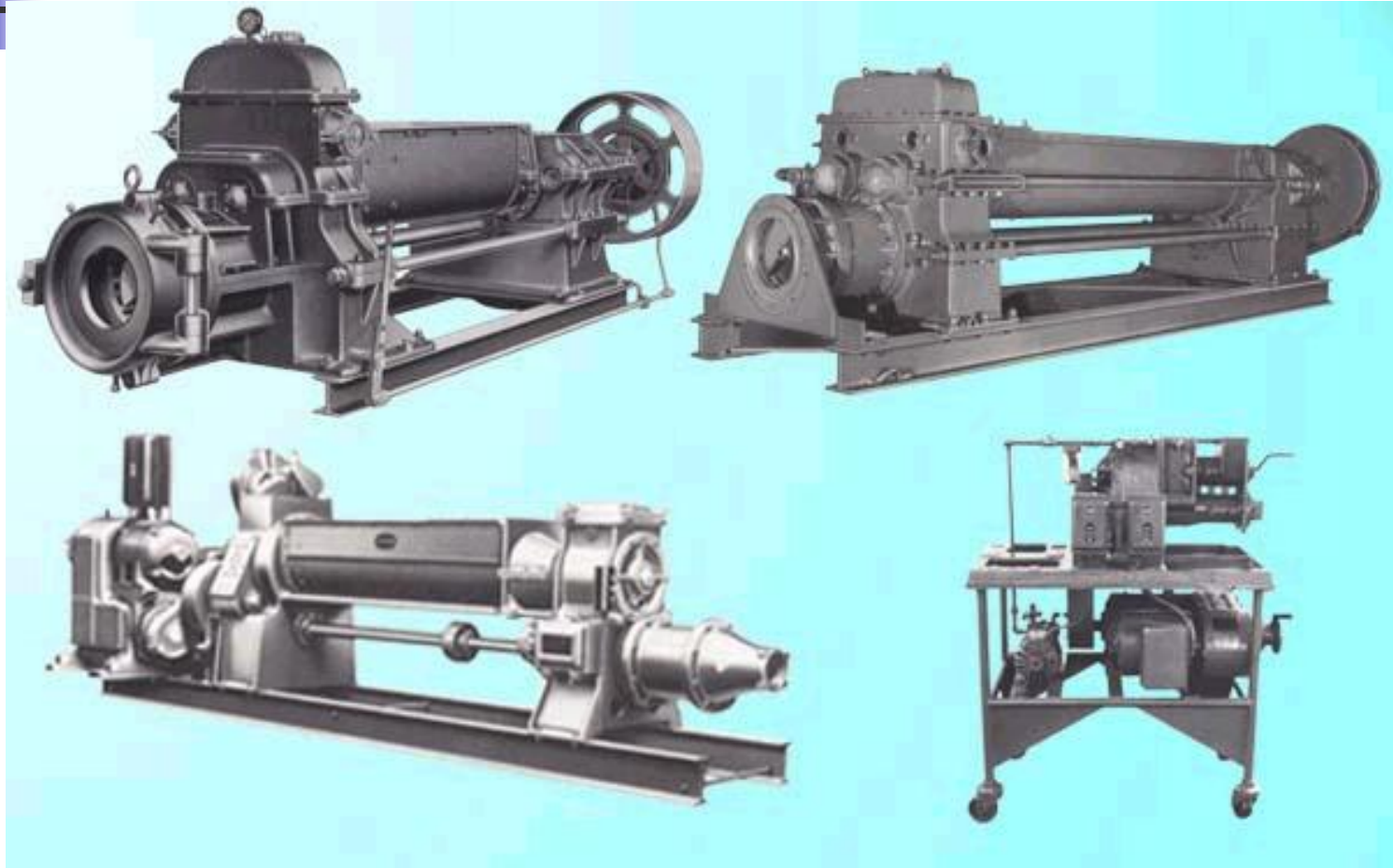


# Produtos fabricados por **Extrusão**

- ★ Blocos de construção civil
- ★ Tubos de cerâmica vermelha (manilhas)
- ★ Peças refratárias:
  - tubos para proteção de termopares
  - tubos para fornos
  - tubos para trocadores de calor
  - mobília de forno
- ★ Isoladores elétricos de porcelana
- ★ Tubos cerâmicos translúcidos para lâmpadas

❖ fabricação de objetos de seção constante

# Exemplos de extrusoras



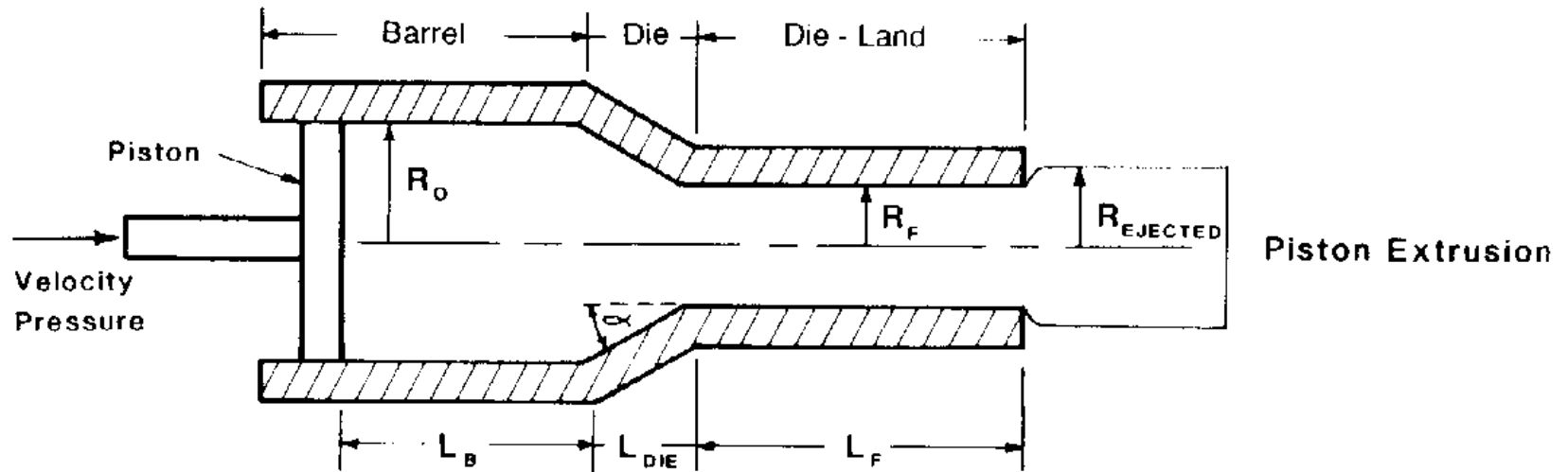


# Exemplos de geometrias de boquilhas usadas na extrusão



# Extrusoras de pistão

[Reed, 1995:453]

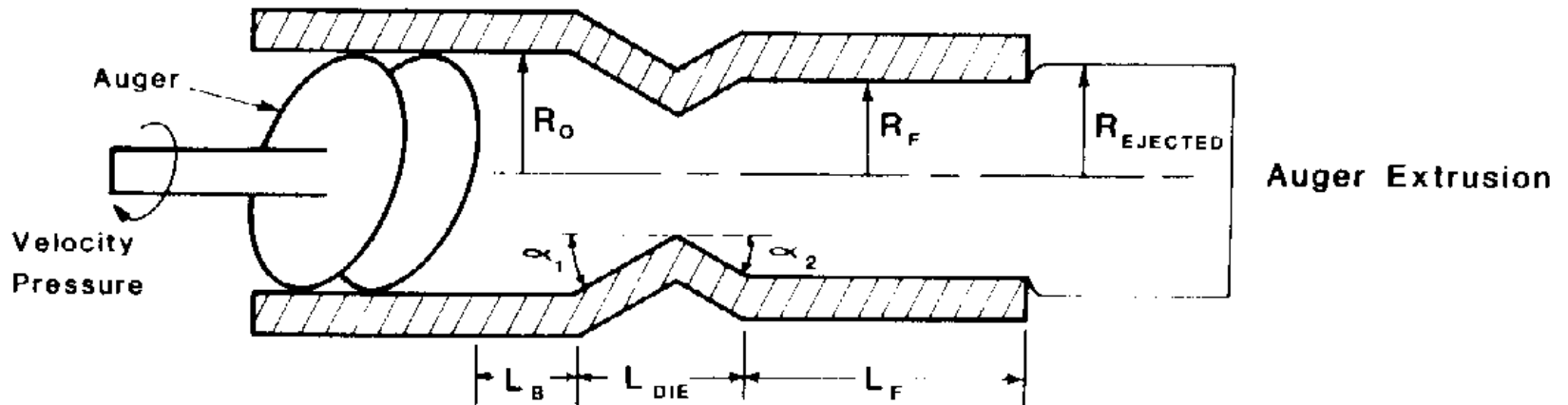


Alimentação: blocos de massa plástica desaerada

Pressões elevadas são geradas

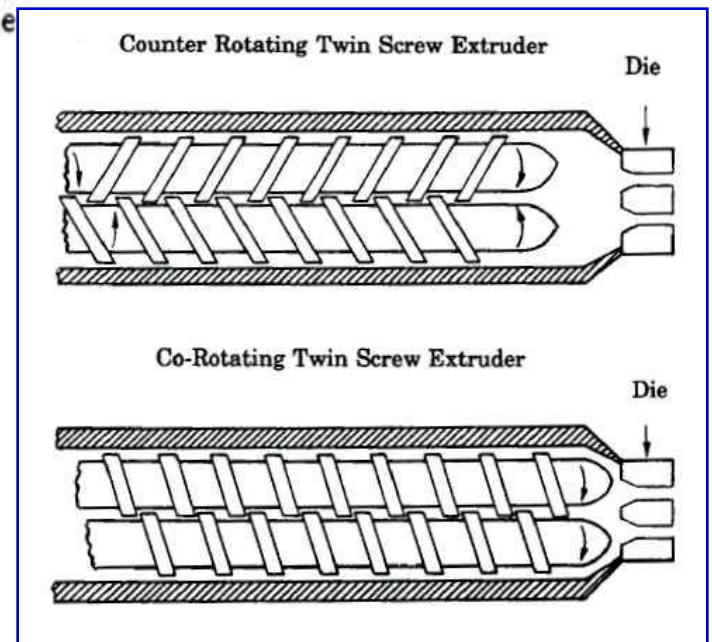
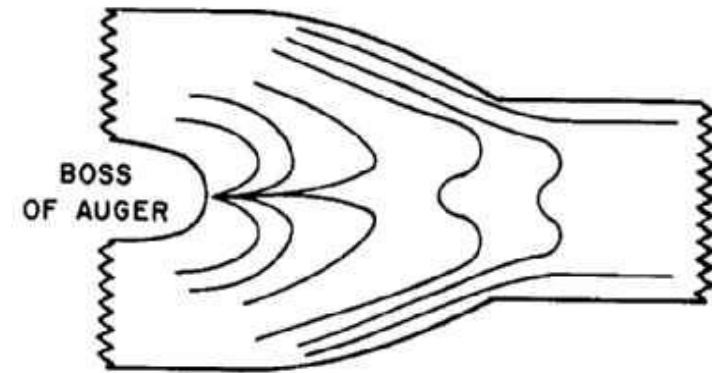
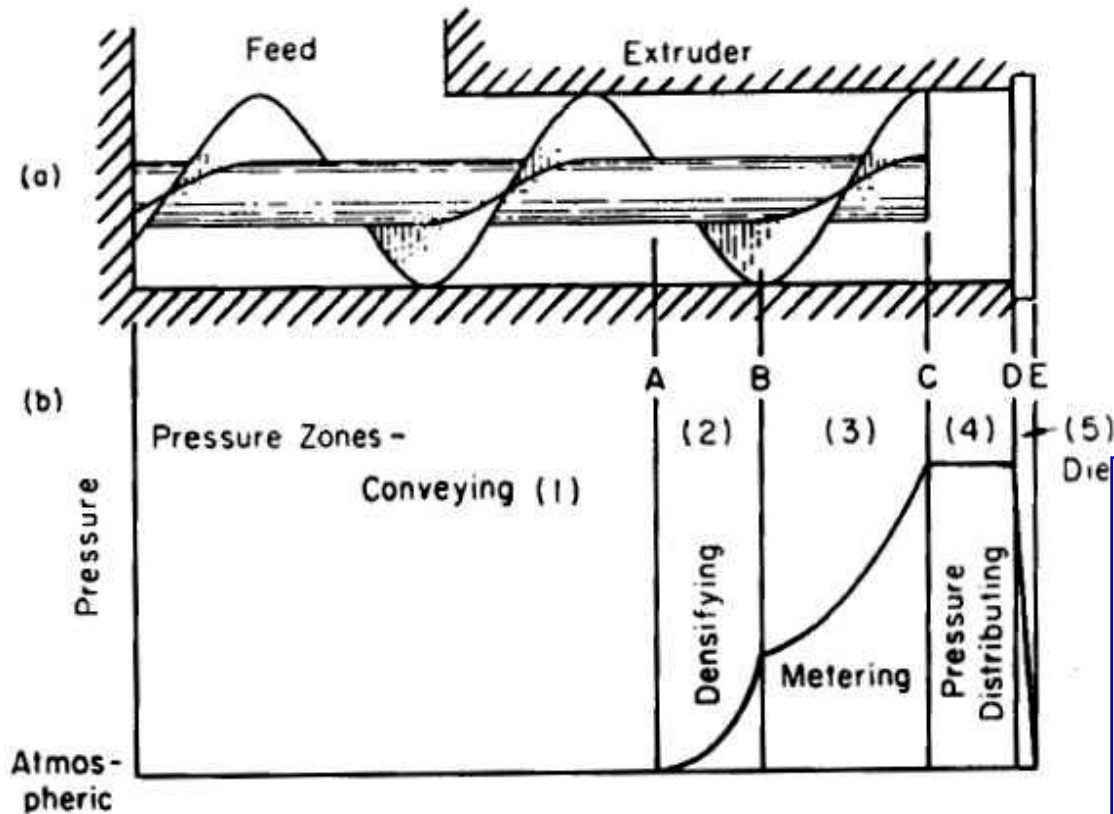
Processo intermitente - baixa produtividade

# Extrusoras de rosca



- ✓ Alimentação: blocos de massa plástica desaerada
- ✓ Pressões menores que na de pistão
- ✓ Processo contínuo - produtividade elevada

# Extrusoras de rosca



# Defeitos em materiais extrudados



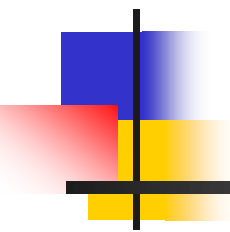
**Seção transversal**



**Seção longitudinal**

# Prensagem plástica de extrudados





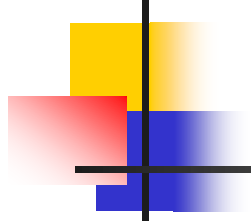
# Conformação plástica Injeção

---

# Moldagem por **Injeção**

- ★ **Desenvolvida originalmente para termoplásticos**
- ★ **Fluxo viscoso do material para o interior de uma cavidade (molde) com a geometria desejada**
- ★ **Redução da temperatura enrijece o material dentro do molde**
- ★ **Processo foi adaptado para processar cerâmicos**
- ★ **Massa injetada → dispersão de grande quantidade de pó cerâmico em um polímero fundido (veículo)**
- ★ **Produtos: peças cerâmicas pequenas, com geometrias complexas e alta precisão dimensional**

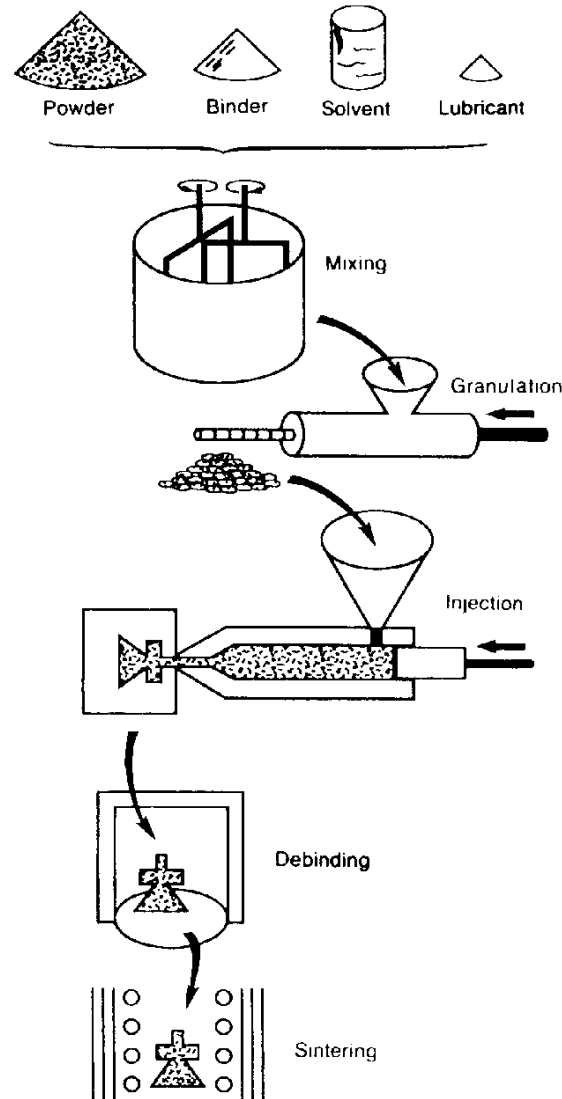




<https://www.youtube.com/watch?v=0hI7wVDa9Ww>

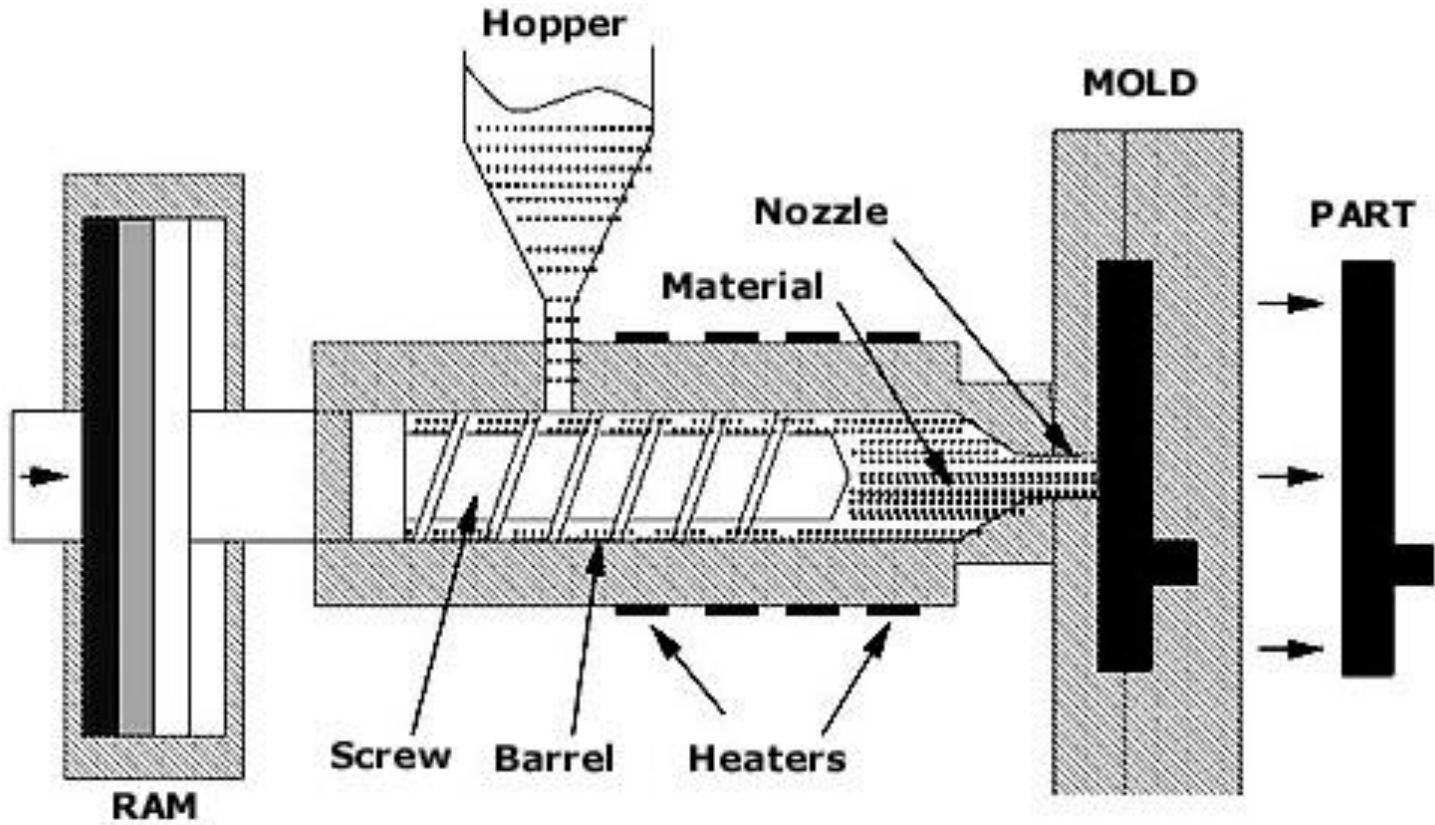
# Esquema de moldagem por injeção

[Reed, 1995:478]



# Injetora

[Reed, 1995:481]



# Injetora

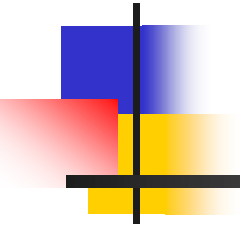




# Defeitos

Estado de Origem	Defeito
Mistura	Aglomerados Ligante Segregadas Contaminação de Produtos de Desgaste
Moldagem	Linhas Orifícios devido à Água Absorvida nos Materiais Orifícios e Trincas devido a Retração Diferencial Defeitos de ejeção
Remoção do Ligante	Trincas devido à Relaxação de Tensões Bolhas “Afundamento” Trincas devido à Decomposição do Ligante " devido a gradientes na remoção do ligante Delaminação da Superfície Contaminação com cinzas de resíduos de ligante

# Sinterização



# Sinterização: definição e força motriz

[Lee, 1994:35]

- ◆ Sinterização pode ser definida como a remoção dos poros entre as partículas iniciais, acompanhada por retração da peça combinada com crescimento e formação de ligações fortes entre partículas adjacentes.
- ◆ A força motriz para a sinterização é a redução da área superficial (e da energia superficial) obtida pela substituição de um pó solto tendo superfícies com alta energia (sólido-vapor) por um sólido ligado tendo contornos de grão com energia mais baixa.



# Sinterização: processos e controle

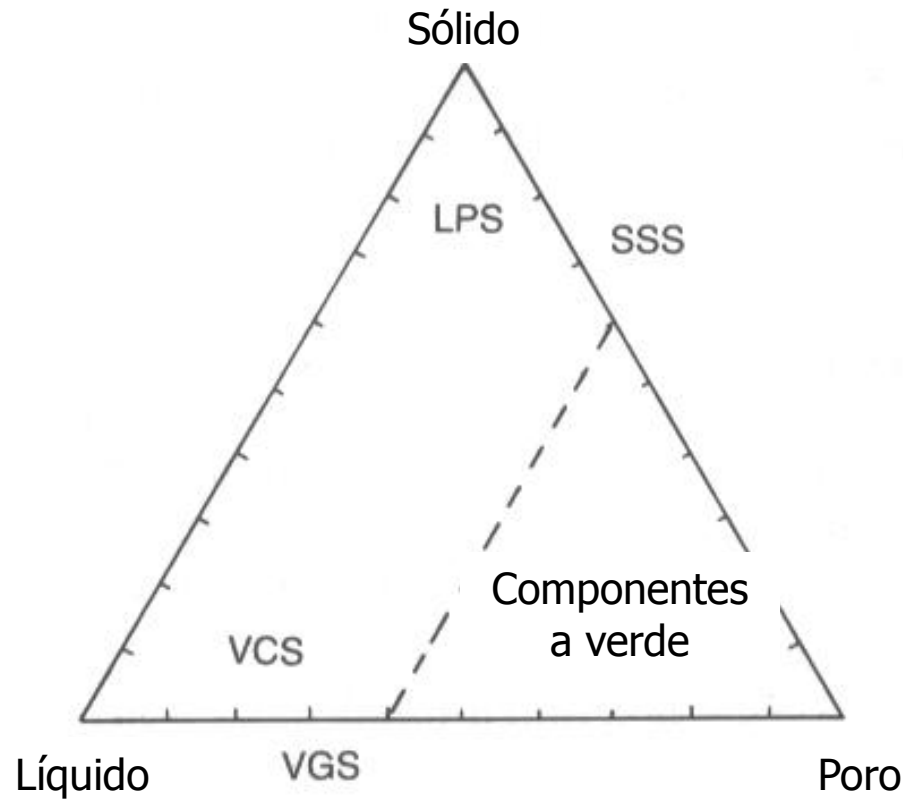
[Lee, 1994:33]

Os processos que ocorrem nos compactos cerâmicos durante o tratamento térmico a altas temperaturas são controlados por:

- Propriedades do compactado a verde (composição, densidade, porosidade, tamanho e forma de partícula, homogeneidade)
- Parâmetros de sinterização (atmosfera, pressão e temperatura, incluindo taxas de aquecimento e resfriamento)

# Sinterização: diagrama

[Lee, 1994:34]



- ◆ Sinterização no estado sólido (SSS)
- ◆ Sinterização com fase líquida (LPS)
- ◆ Sinterização vítrea viscosa (VGS) ou de fluxo viscoso
- ◆ Sinterização compósita viscosa (VCS) ou vitrificação

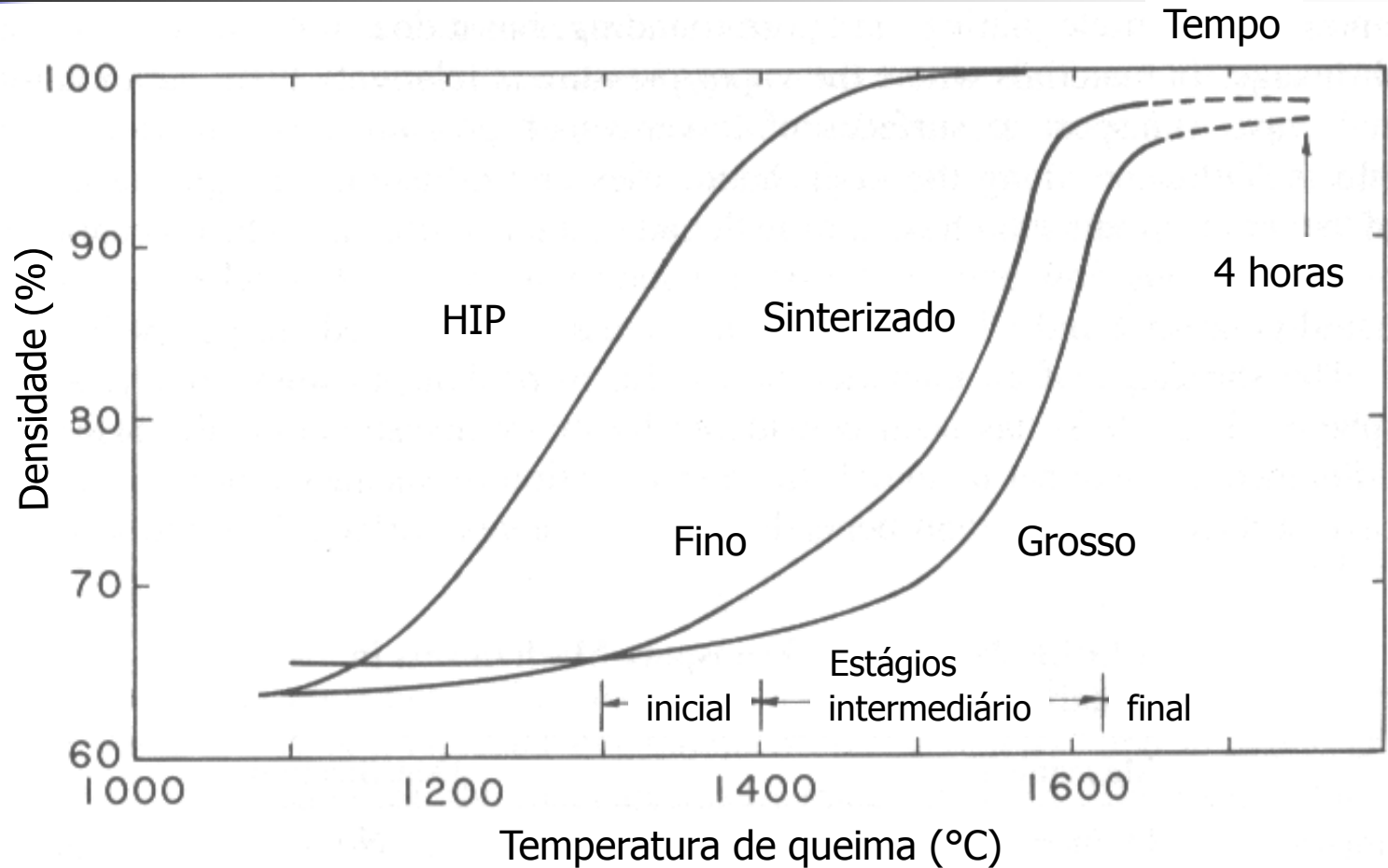
# Sinterização

[Lee, 1994:34; Reed, 1995: 595]

- ◆ **Sinterização no estado sólido (SSS):** somente partículas sólidas e poros. Ex.:  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,5 \text{ m\% MgO}$ ;  $\text{ZrO}_2 + 3 \text{ m\% Y}_2\text{O}_3$ ;  $\text{SiC} + 2 \text{ m\% B}_4\text{C}$ .
- ◆ **Sinterização com fase líquida (LPS):** três componentes, mas concentra-se na parte sólida (<20% líquido). Ex.:  $\text{Si}_3\text{N}_4 + 5\text{-}10 \text{ m\% Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  ou  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .
- ◆ **Sinterização vítrea viscosa (VGS) ou de fluxo viscoso:** somente líquido (vidro fundido) e porosidade. Ex.: esmaltes cerâmicos.
- ◆ **Sinterização compósita viscosa (VCS) ou vitrificação:** conteúdos de líquido maiores que LPS (>20% líquido). Ex.: cerâmica branca (porcelana).

# Sinterização: $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$

[Reed, 1995:595]



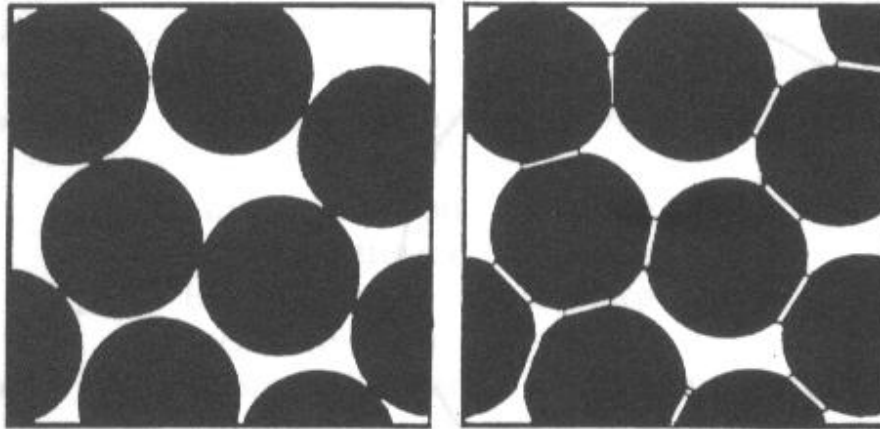
# Sinterização no estado sólido: estágios e características

[Lee, 1994:35]

- ◆ Sinterização inicial: rearranjo das partículas de pó e formação de uma ligação forte ou pescoço nos pontos de contato entre partículas; densidade relativa aumenta ~10%.
- ◆ Sinterização intermediária: tamanho dos contatos aumenta, porosidade diminui substancialmente e partículas se aproximam levando à retração da peça; contornos de grão (e grãos) são formados e crescem lentamente; densidade relativa pode chegar a ~90%; estágio termina quando os poros estão isolados.
- ◆ Sinterização final: poros se fecham e são eliminados lentamente com pouca densificação; tamanho de grão aumenta.

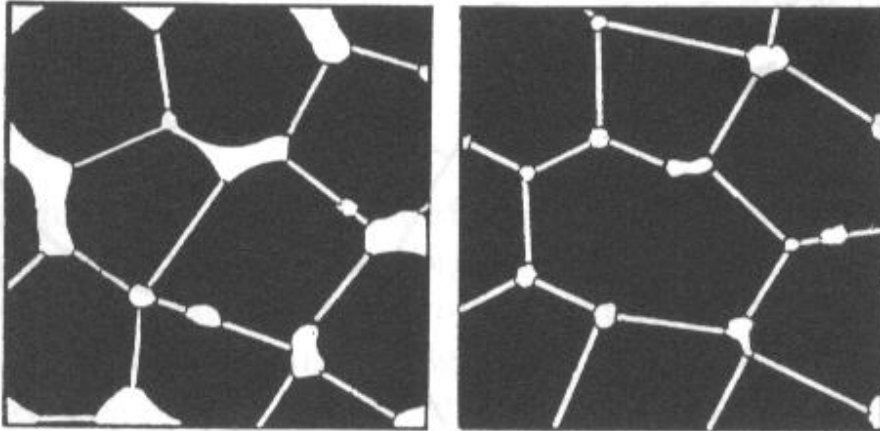
# Sinterização no estado sólido: estágios e microestrutura

[Lee, 1994:35]



(a)

(b)



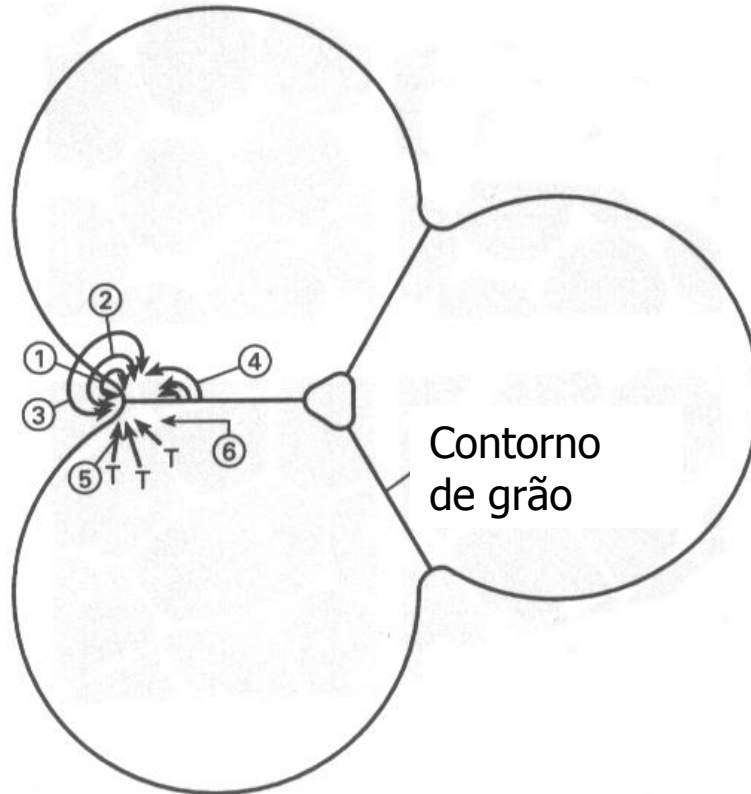
(c)

(d)

- (a) Partículas soltas
- (b) Estágio inicial
- (c) Estágio intermediário
- (d) Estágio final

# Sinterização no estado sólido: transporte de massa

[Lee, 1994:35]



- (1) Difusão superficial
- (2) Difusão volumétrica
- (3) Evaporação-condensação
- (4) Difusão volumétrica
- (5) Difusão volumétrica
- (6) Difusão no contorno de grão

$a$  = raio da partícula

$x$  = raio do pescoço

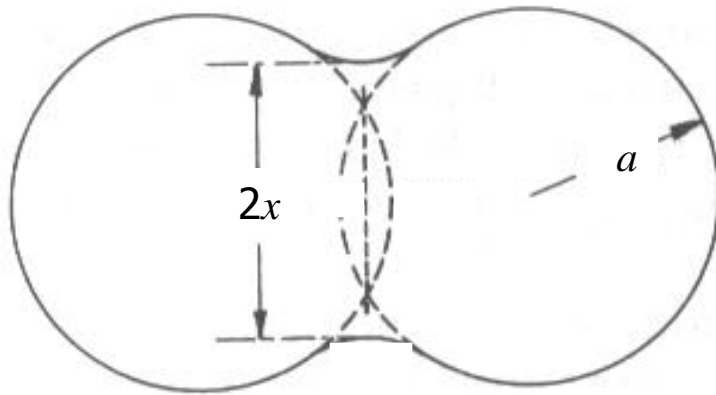
# Mecanismos de transporte de massa

[Lee, 1994:34; Reed, 1995: 595]

<b>Nº</b>	<b>Transporte</b>	<b>Origem</b>	<b>Destino</b>	<b>Densificação</b>
1	Difusão superficial	Superfície	Pescoço	Não
2	Difusão volumétrica	Superfície	Pescoço	Sim
3	Evaporação-condensação	Superfície	Pescoço	Não
4	Difusão volumétrica	Contorno de grão	Pescoço	Sim
5	Difusão volumétrica	Discordâncias	Pescoço	Sim
6	Difusão no contorno de grão	Contorno de grão	Pescoço	Sim
	Fluxo viscoso			Sim
	Fluxo plástico			Sim



# Sinterização no estado sólido: modelo de duas esferas



$$x^n / a^m = f(T) \cdot t$$

onde:

$x$  = raio do pescoço

$a$  = raio da partícula

$f(T)$  = função numérica,  
dependendo da  
geometria do modelo

$t$  = tempo de sinterização

$n, m$  = expoentes para os  
diferentes mecanismos

# Mecanismos de transporte de massa

[Lee, 1994:34; Reed, 1995: 595]

Nº	Transporte	n	m	Densificação
1	Difusão superficial	6-7	3	Não
2	Difusão volumétrica	4-5	2	Sim
3	Evaporação-condensação	3	1	Não
4	Difusão volumétrica	4-5	2	Sim
5	Difusão volumétrica	4-5	2	Sim
6	Difusão no contorno de grão	6	2	Sim
	Fluxo viscoso	2	1	Sim
	Fluxo plástico	2	1	Sim

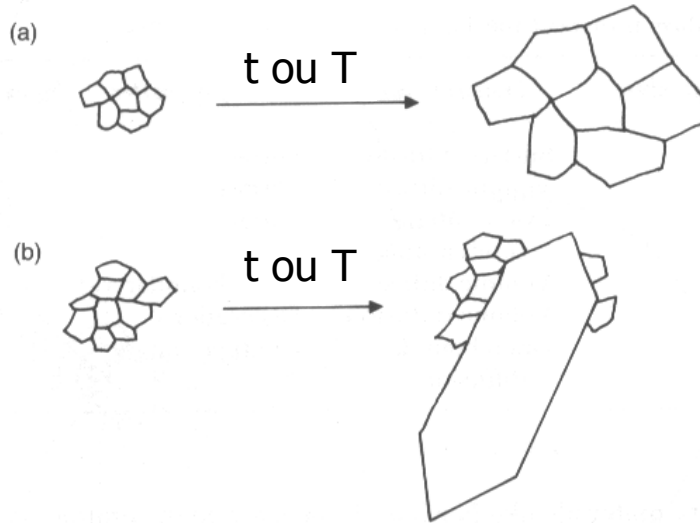
# Crescimento de grão: definição e força motriz

[Lee, 1994:39]

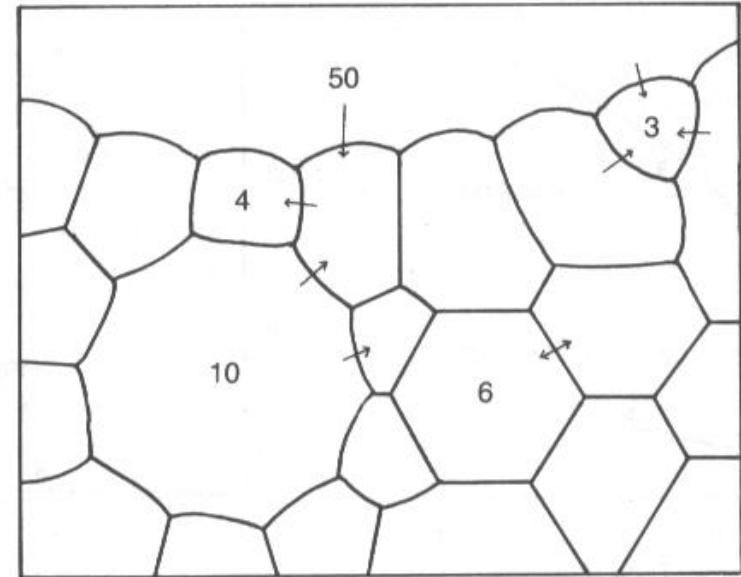
- ◆ Crescimento de grão é o processo pelo qual o tamanho médio de grão de um material (livre de tensão ou quase) aumenta continuamente durante o tratamento térmico sem uma mudança da distribuição de tamanho de grão.
- ◆ Os grãos crescem pelo movimento dos contornos. A força motriz é a diferença na energia livre do material nos dois lados de um contorno de grão, que faz com que o contorno se mova na direção de seu centro de curvatura.

# Crescimento de grão: tipos e direção

[Lee, 1994:40-41]



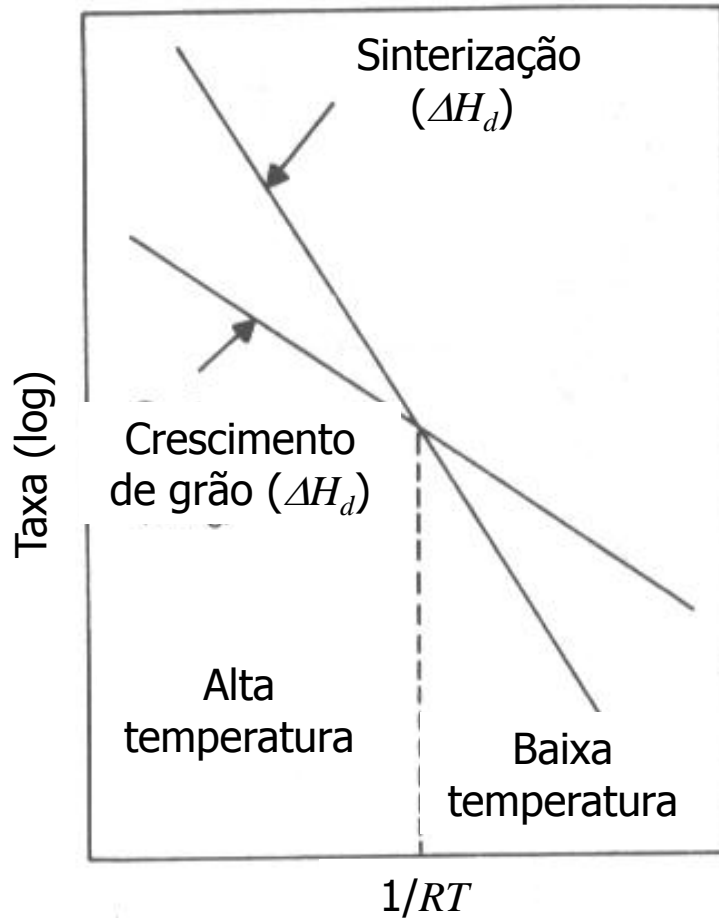
- (a) Crescimento normal
- (b) Crescimento anormal



Setas indicam direção de deslocamento de contornos

# Sinterização versus crescimento de grão

[Reed, 1995:596]



Para um material no qual:

$$\Delta H_d > \Delta H_c$$

onde:

$\Delta H_d$  = energia de ativação de densificação

$\Delta H_c$  = energia de ativação de crescimento de grão

# Sinterização com fase líquida: requisitos

[Lee, 1994:50]

- ◆ Líquido suficiente deve estar presente na temperatura de sinterização. Para partículas de cerca de  $1\ \mu\text{m}$ , menos de 1 V% líquido é suficiente para cobri-las uniformemente. Usualmente, para partículas maiores, 5-15% é usado.
- ◆ O líquido deve molhar o sólido.
- ◆ O sólido deve ser parcialmente solúvel no líquido.
  
- ◆ Outras variáveis importantes :
  - Tamanho de partícula do pó
  - Grau de mistura
  - Viscosidade do líquido formado

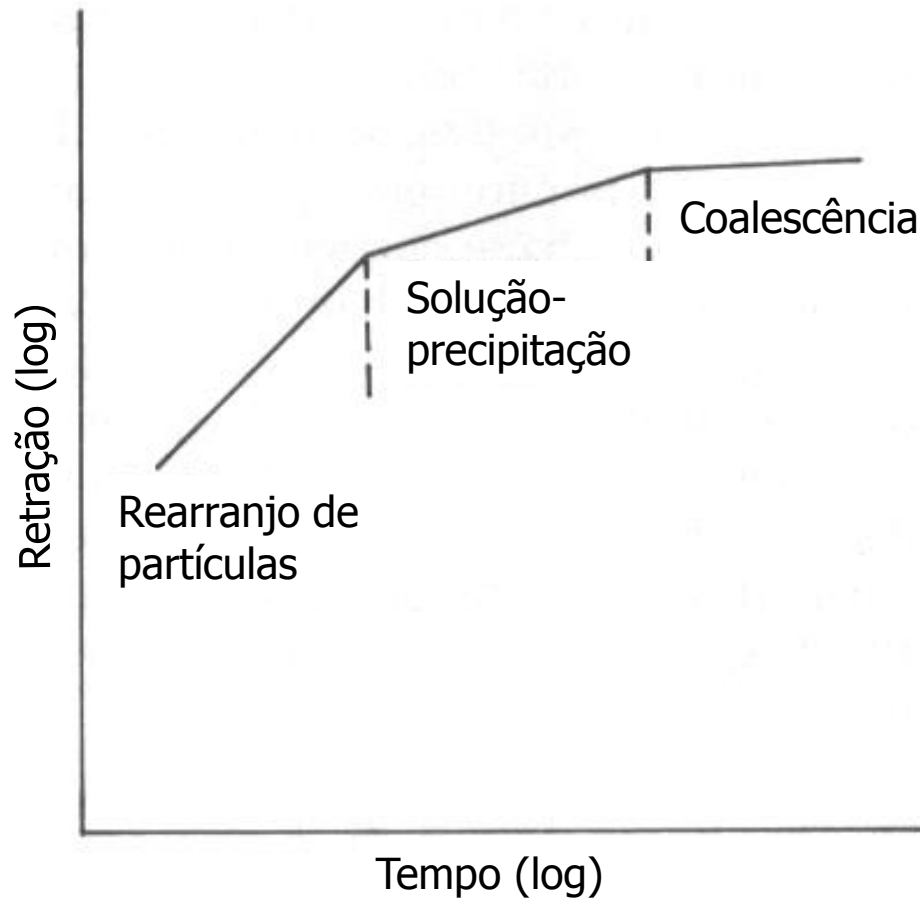
# Sinterização com fase líquida: estágios e características

[Lee, 1994:50]

- ◆ Rearranjo de partículas: formação e fluxo viscoso de um líquido que molha o sólido, se espalha e junta as partículas por pressão capilar, causando alguma densificação.
- ◆ Solução-precipitação: dissolução de
  - partículas sólidas pequenas no líquido e precipitação nas superfícies sólidas de partículas grandes;
  - contatos partícula-partícula e precipitação em grãos não comprimidos;
  - cantos agudos e precipitação em superfícies côncavas.
- ◆ Coalescência: crescimento de grão ocorre de modo a formar um esqueleto sólido de partículas.

# Sinterização com fase líquida: retração em função do tempo

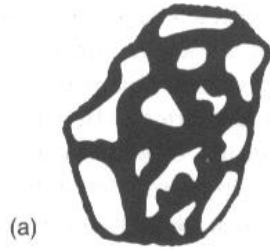
[Lee, 1994:51]



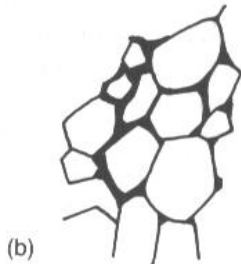


# Sinterização com fase líquida: microestruturas

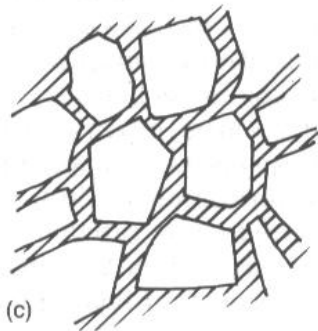
[Lee, 1994:53]



(a) Grande volume de fase vítrea contínua



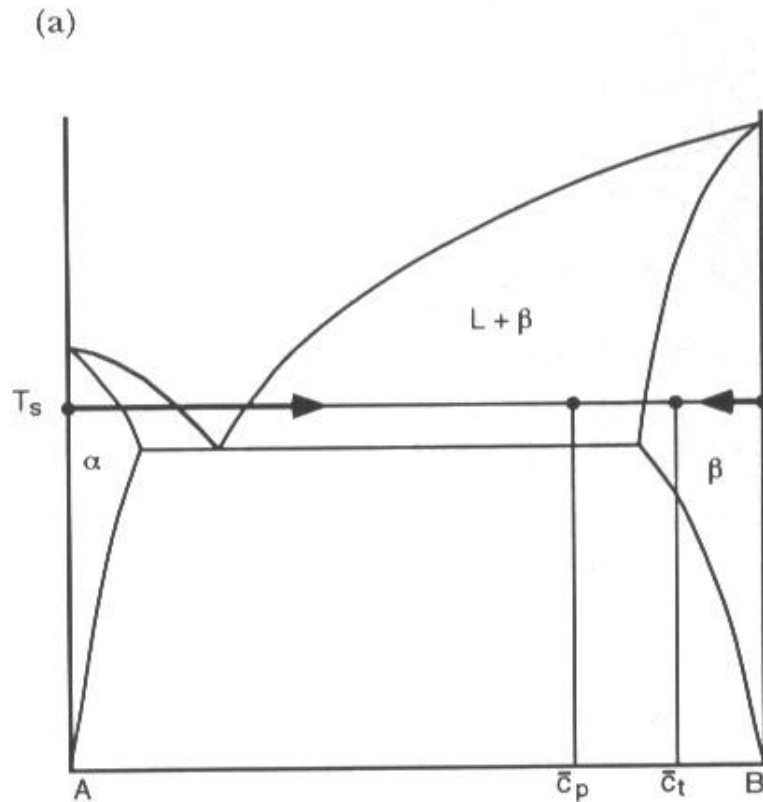
(b) Vidro só aparece nas junções triplas



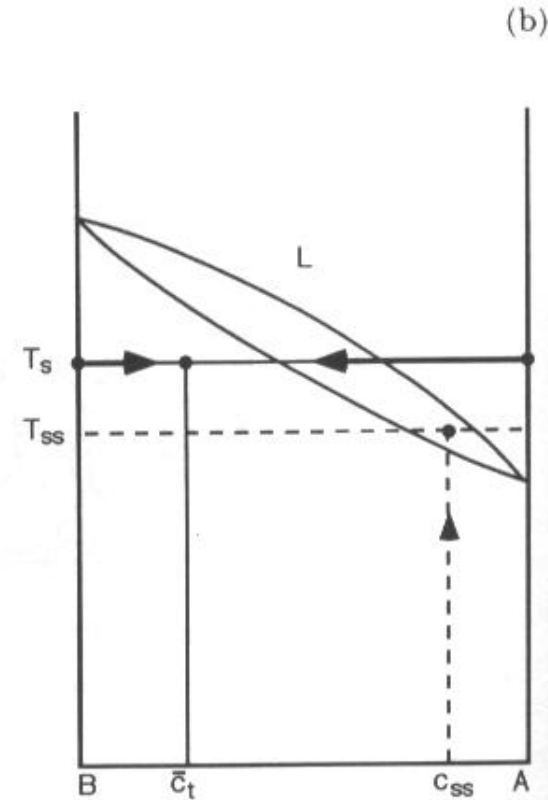
(c) Vidro cristalizado no contorno de grão (fase líquida transiente)

# Sinterização: diagramas de fase

[Thummler, 1993:222]



(a) Sinterização com fase líquida permanente e transiente



(b) Sinterização no estado sólido e supersólido

# Sinterização: variantes de produção

Table 10.1 Production variants in powder metallurgy, including special ceramics and semi-finished products, starting from powder ready for use

1 Single sinter process	2 Double sinter process	3 Indirect shaping	4 Pressureless (loose powder) sintering	5 Hot pressing (pressure sintering)	6 Hot isostatic pressing (HIP) <sup>3)</sup>			7 Powder forging	8 Infiltration
					a With can	b Can-free <sup>4)</sup>	c Can-free sinter-HIP <sup>4)</sup>		
Compaction (die or isostatic, injection moulding, slip casting, extrusion)	1st Compaction	Compaction	Shaping (powder pouring, vibration)	Compaction (die or isostatic) or pressureless shaping	Compaction (die, isostatic or pressureless shaping)		Compaction	Compaction (die)	Compaction (die or isostatic)
Presintering <sup>1)</sup> (lubricant removal)	1st Sintering	Presintering <sup>1)</sup> (increase of strength) Machining (final shaping)			Canning (gas-tight in thin-walled sheet)		Unpressurized sintering in HIP-equipment to pore closure (TD >>93%)		Sintering (porosity has to remain inter-connected)
Sintering (with or without liquid phase)	2nd Compaction 2nd Sintering	Sintering (with or without liquid phase)	Sintering	Hot pressing (graphite die)	HIP	HIP of sintered product (≥ 93%TD) with closed porosity to >>98%TD	Application of pressure at temperature, HIP	Sintering or heating-up only (eventual inductive)	
Sizing <sup>2)</sup>	Sizing <sup>2)</sup>							Hotforging (die, >> 95%TD)	Infiltration (metal or polymer)
Finishing <sup>5)</sup> Production examples: engine parts, magnets, contacts, filters, cemented carbides, special ceramics	Finishing <sup>5)</sup> High-strength/high-density engine parts	Finishing <sup>5)</sup> Cemented carbides, as parts or semifinished products, special ceramics	Finishing <sup>5)</sup> Filters, diaphragms	Finishing <sup>5)</sup> Hardmetal drawing tools, special ceramics and PM products	Finishing <sup>5)</sup> Special ceramics and PM products, as parts or semifinished	Finishing <sup>5)</sup> Cemented carbides, special materials, defect healing	Finishing <sup>5)</sup> Cemented carbides, special ceramics	Finishing <sup>5)</sup> Highest strength alloyed engine parts	Finishing <sup>5)</sup> Heavy duty electrical contacts, bearings, high strength engine parts