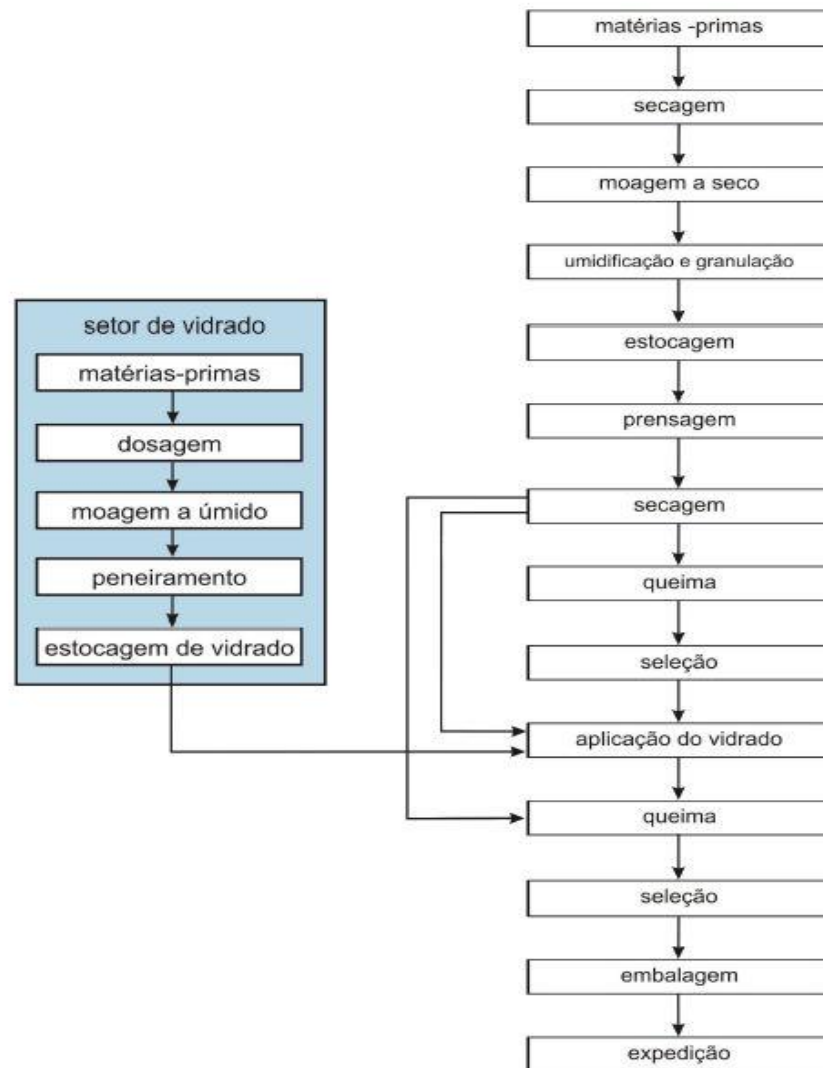


Processamento de Materiais Cerâmicos

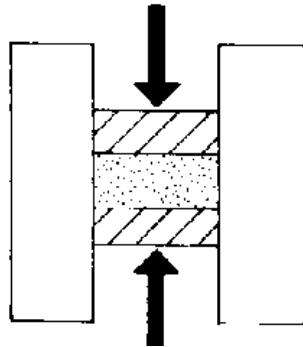
Processos de conformação

FLUXOGRAMA 6 - PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE MATERIAIS DE REVESTIMENTO (PLACAS CERÂMICAS) POR VIA SECA

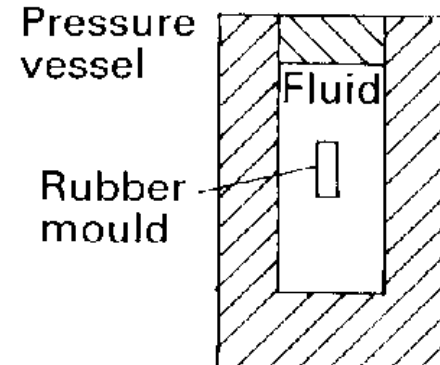


Técnicas de conformação 1

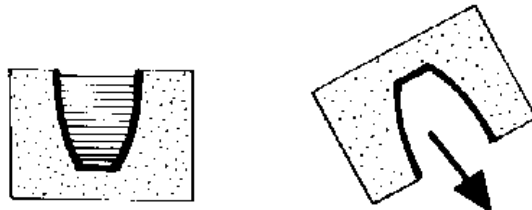
[Lee, 1994:29]



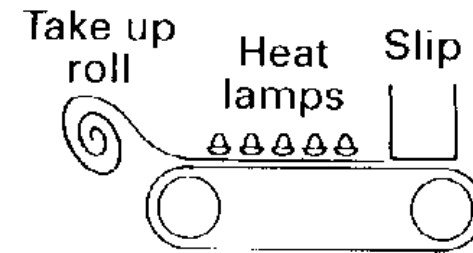
Prensagem uniaxial



Prensagem isostática



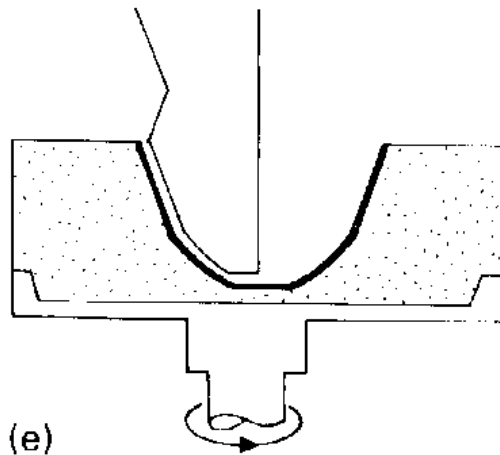
(c)
Colagem de barbotina



(d)
Colagem de folhas

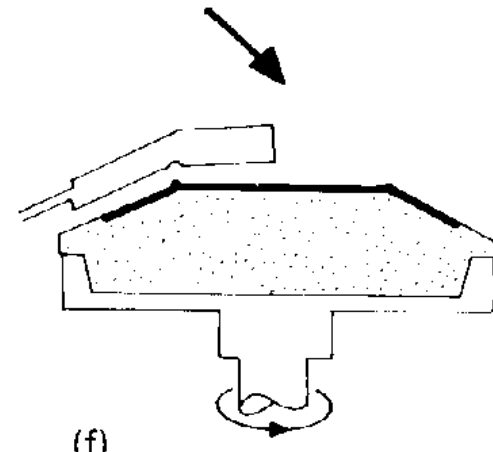
Técnicas de conformação 2

[Lee, 1994:29]



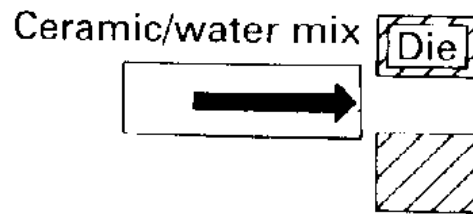
(e)

Jollying

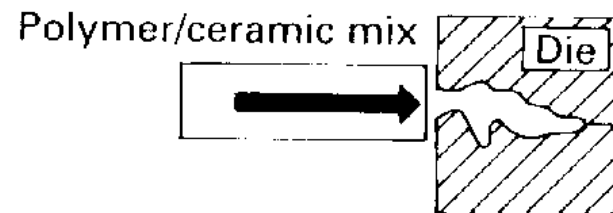


(f)

Jiggering



Extrusão



Moldagem por injeção

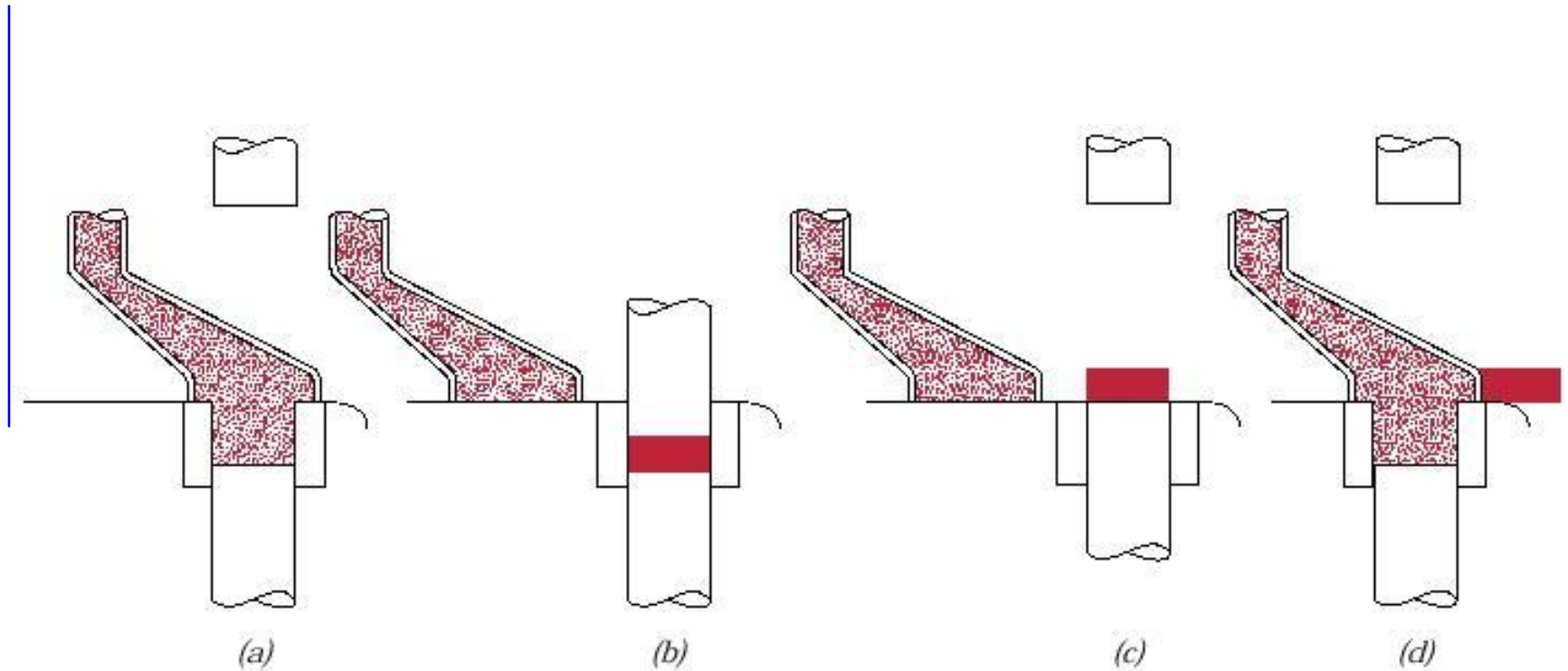
Processos de conformação: características

[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

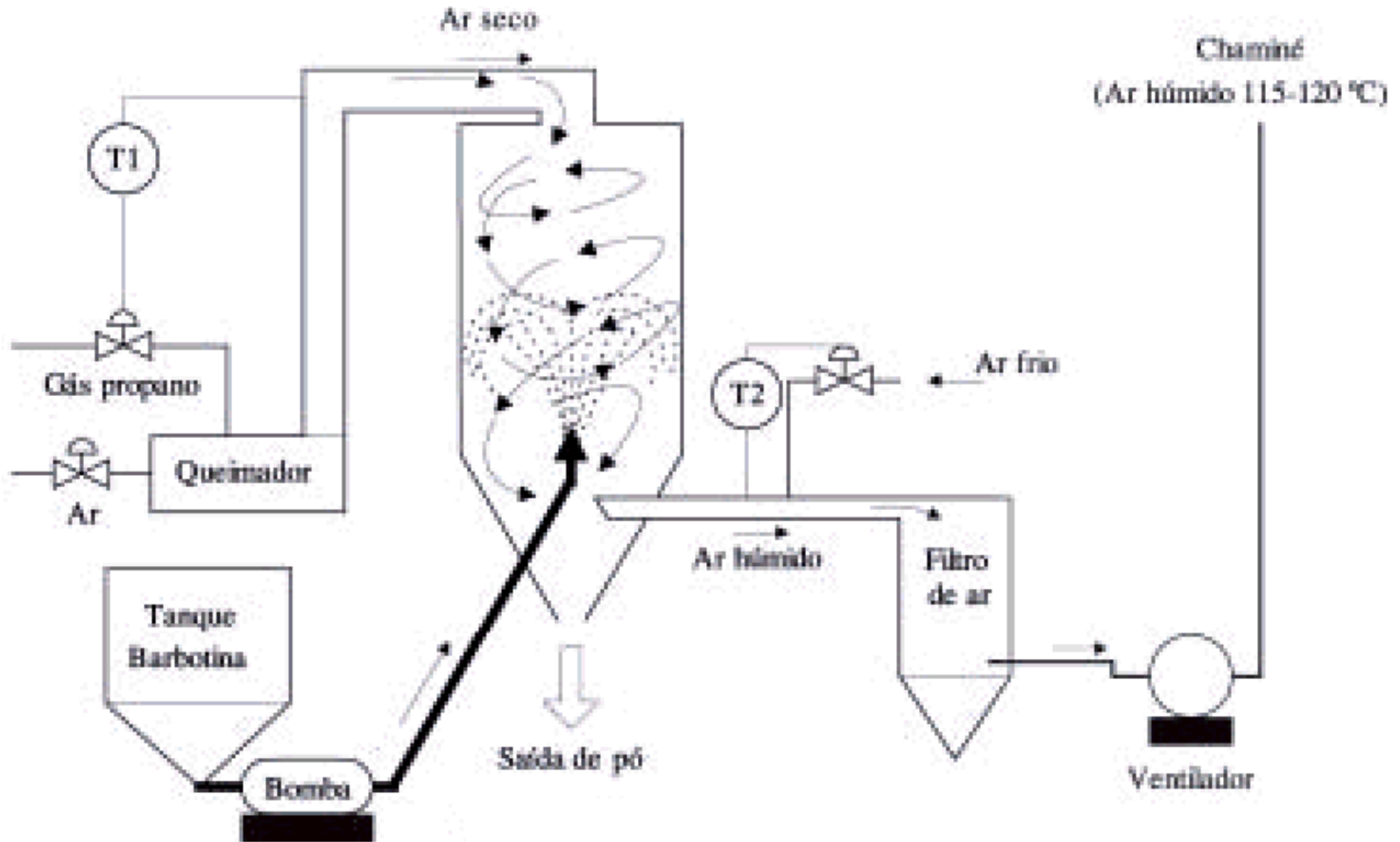
- ✓ A massa deverá ser constituída por grânulos de geometria esférica (ou aproximadamente esférica), de tamanho superior a 60 μm , e textura o mais lisa possível.
- ✓ As características mecânicas dos grânulos, tais como dureza, resistência mecânica e plasticidade devem ser adequadas.

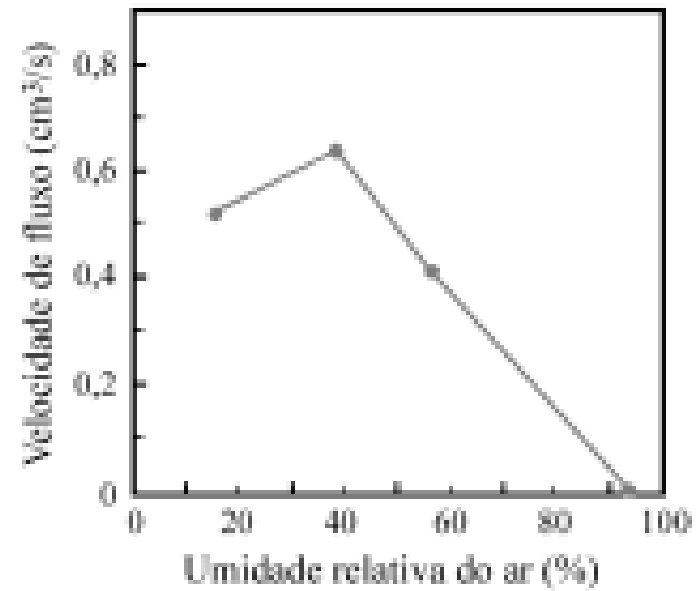
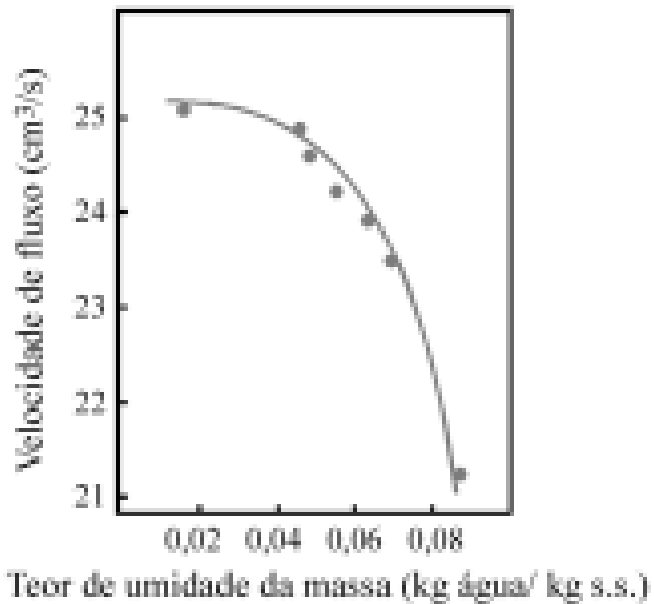
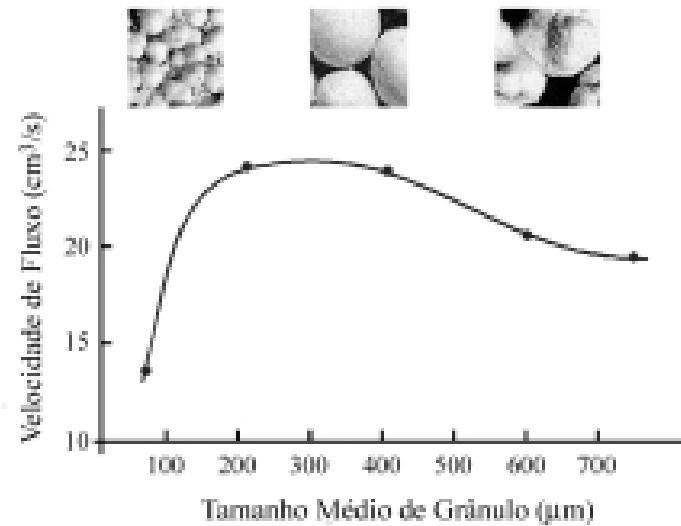
IMPORTANTE

- ✓ 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

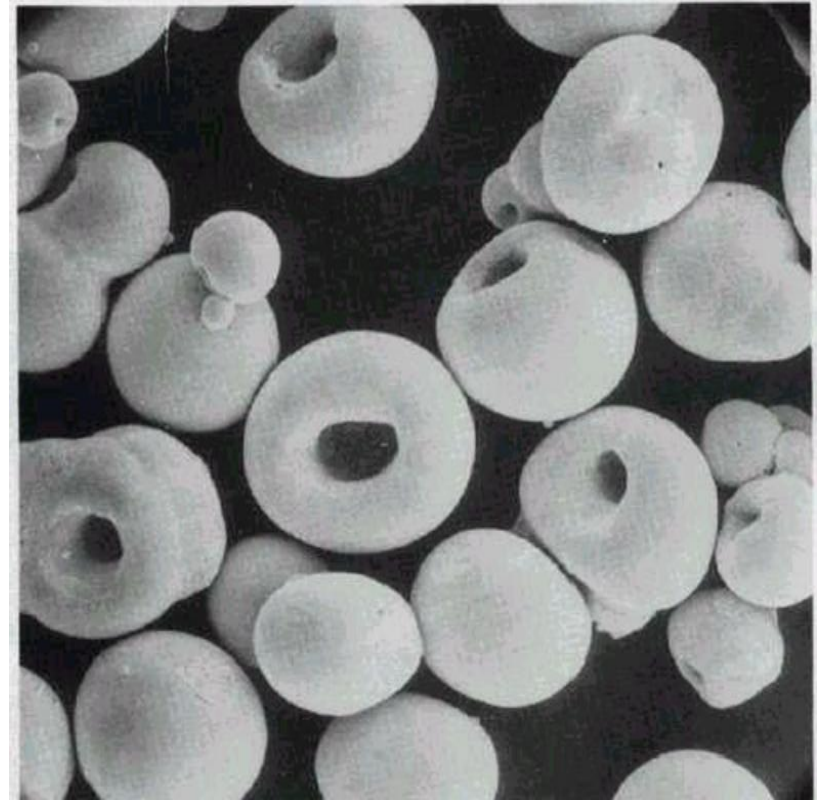
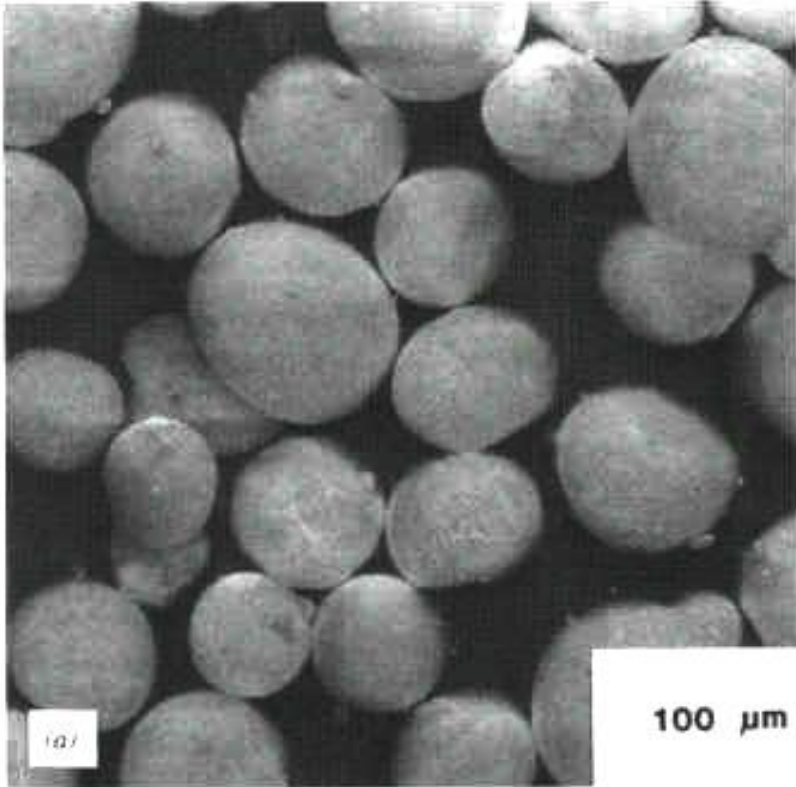
Secagem por atomização





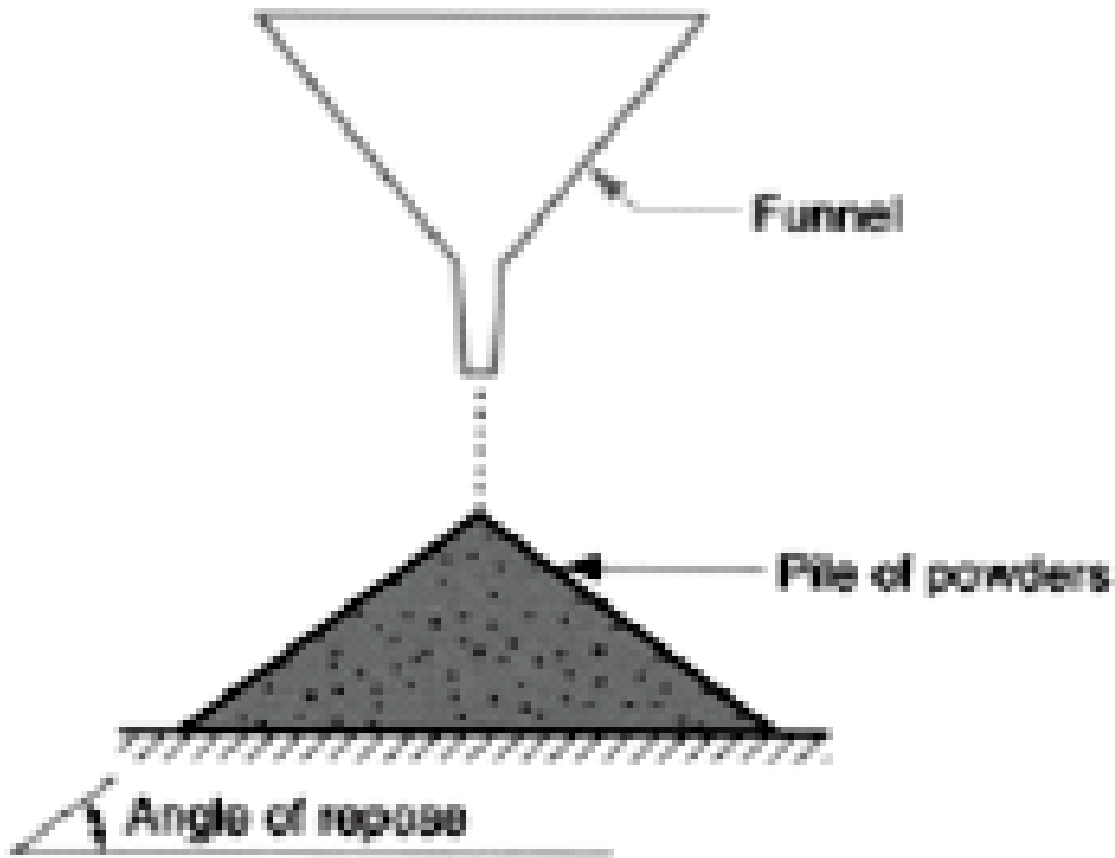
Granulação

[Reed, 1995:388]



Preenchimento

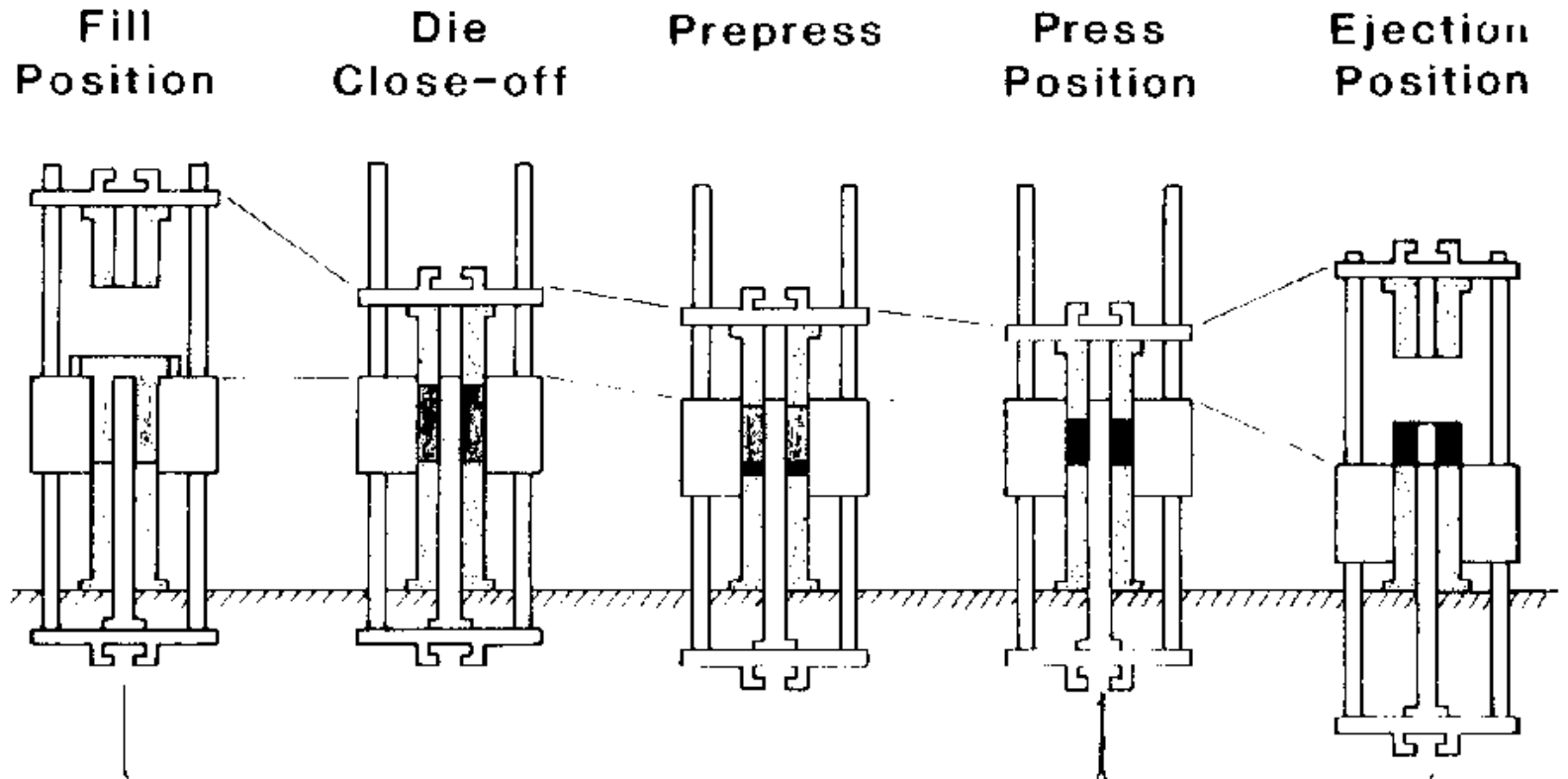
Ângulo de Repouso



Ângulos de repouso pequenos favorecem um preenchimento regular do molde

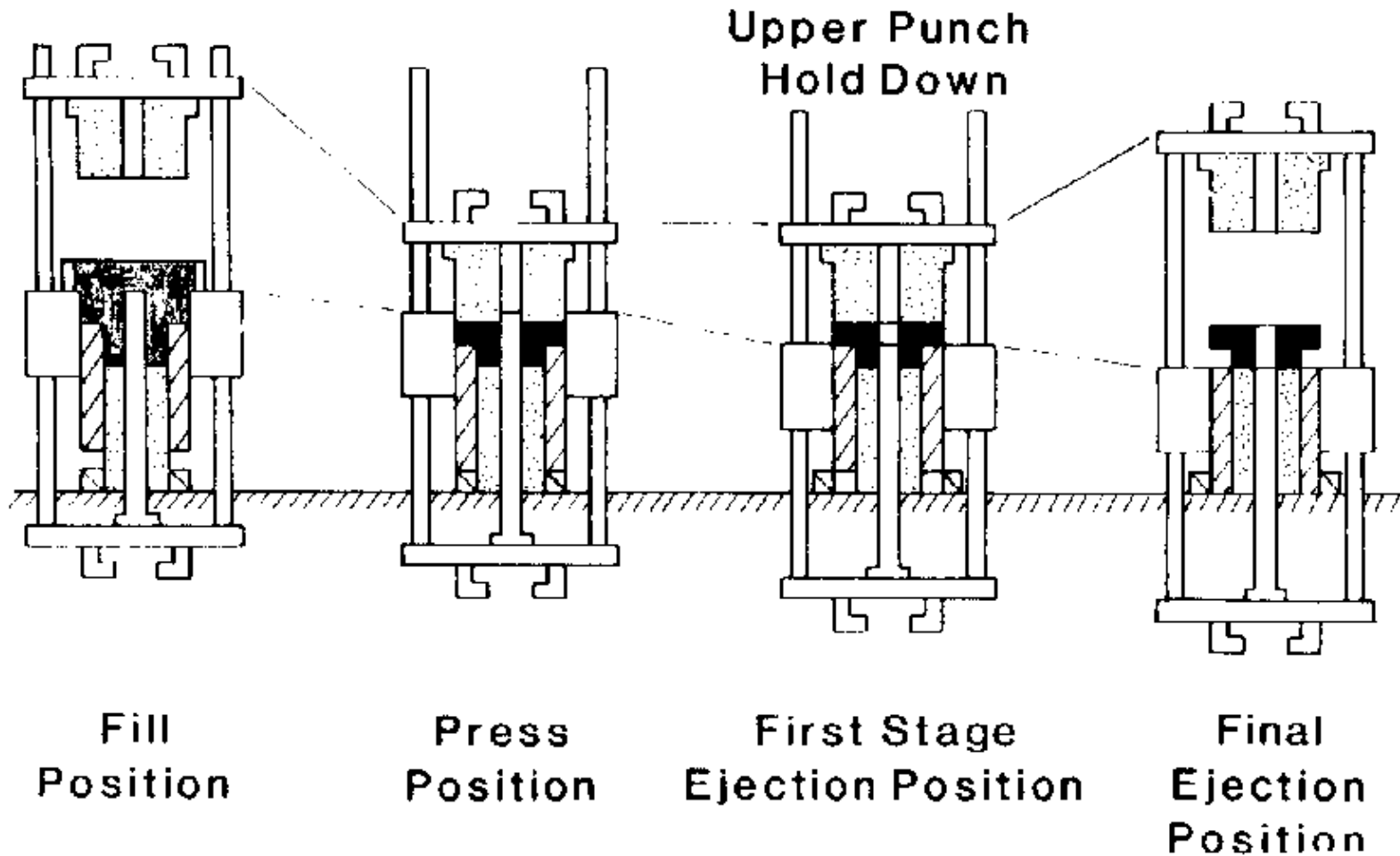
Prensagem: simples efeito

[Reed, 1995:420]



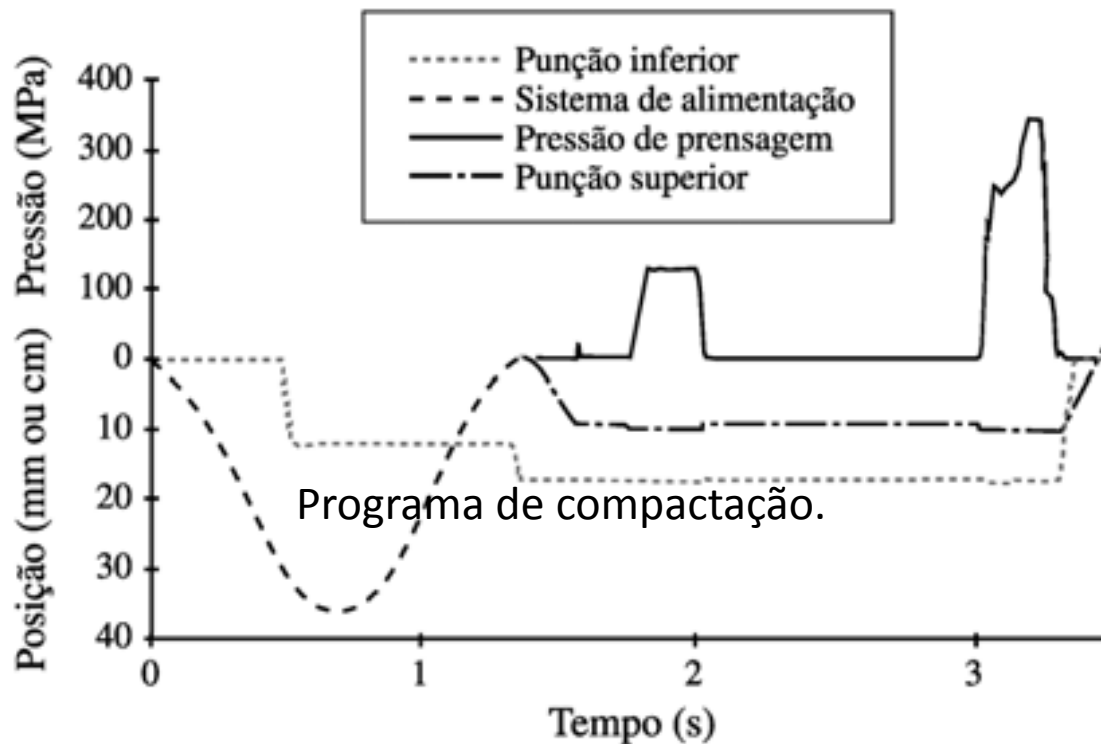
Prensagem: duplo efeito

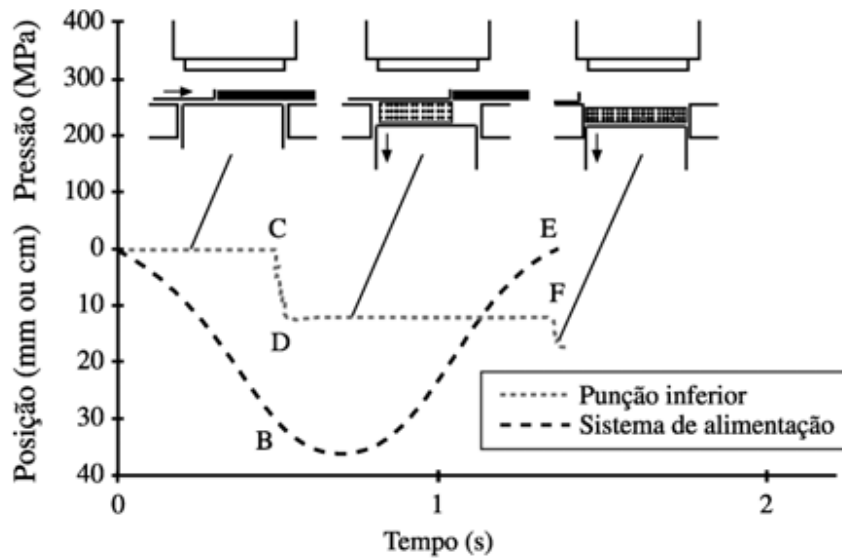
[Reed, 1995:420]



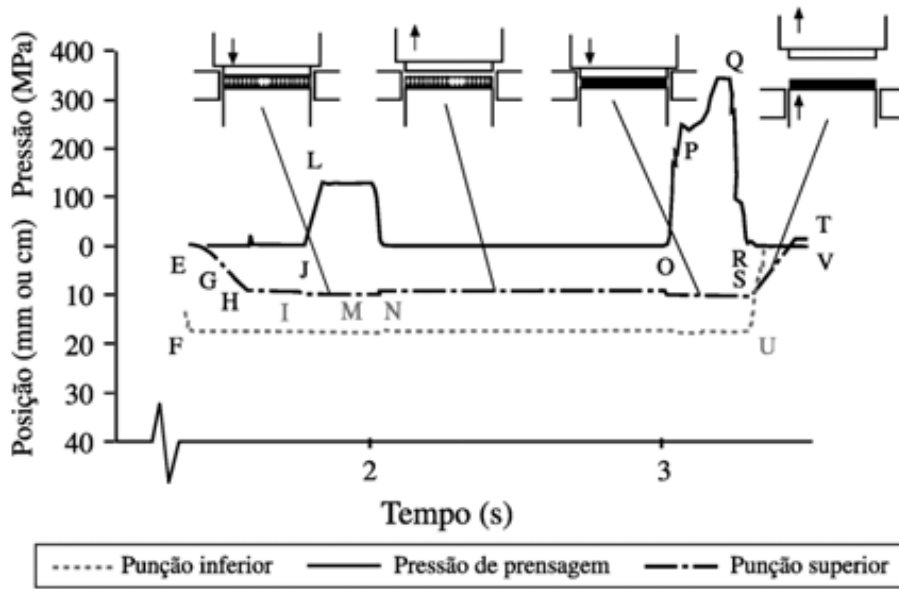
O ciclo de prensagem ou programa de compactação é constituído pelas seguintes etapas:

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





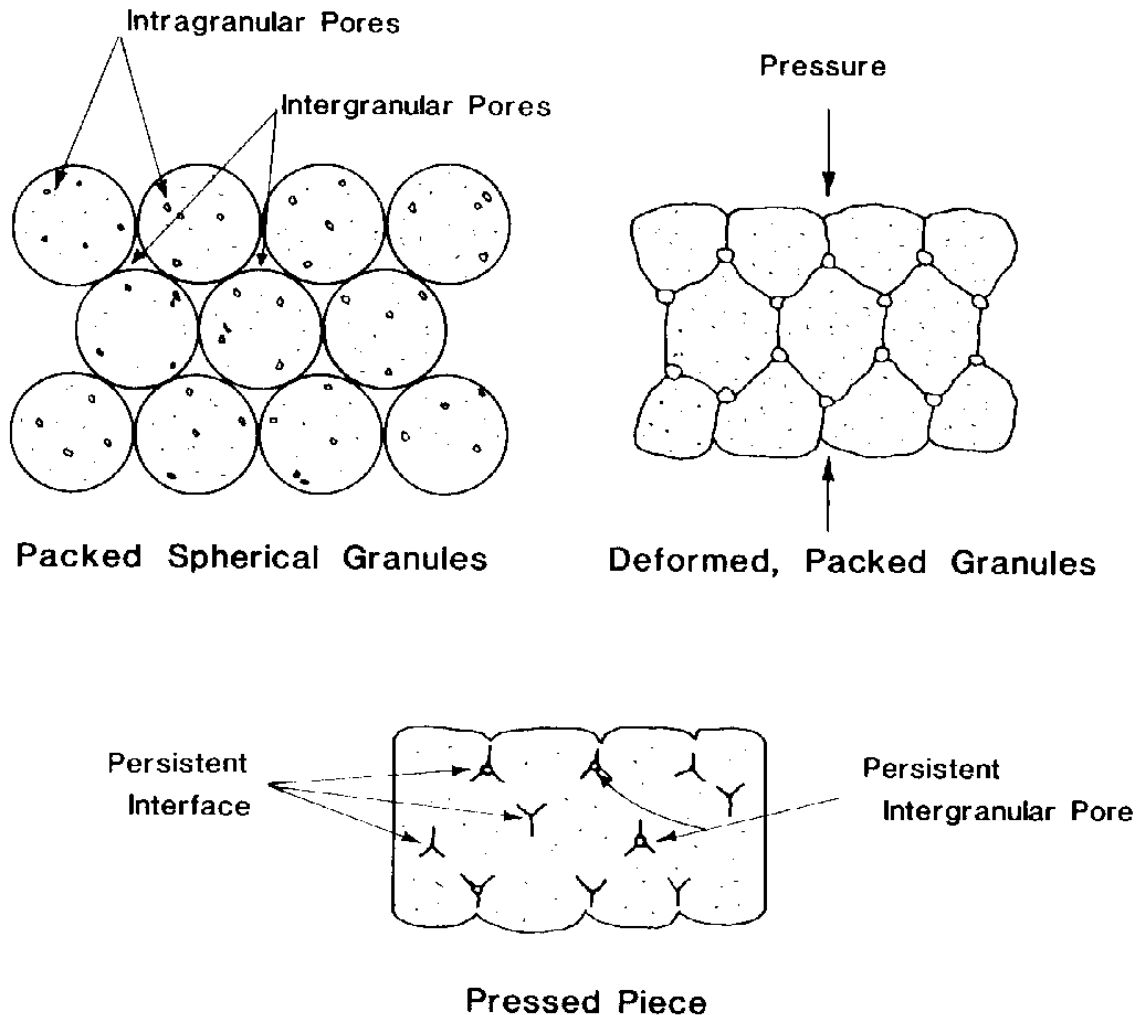
Programa de compactação. Preenchimento do molde.



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

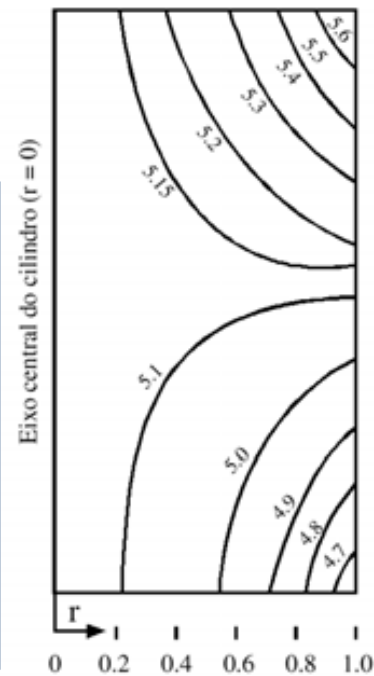
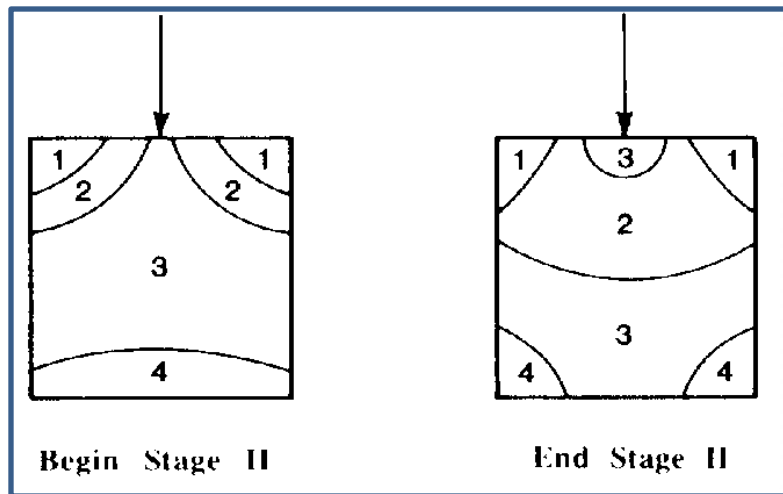
III. Densificação dos grânulos

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**

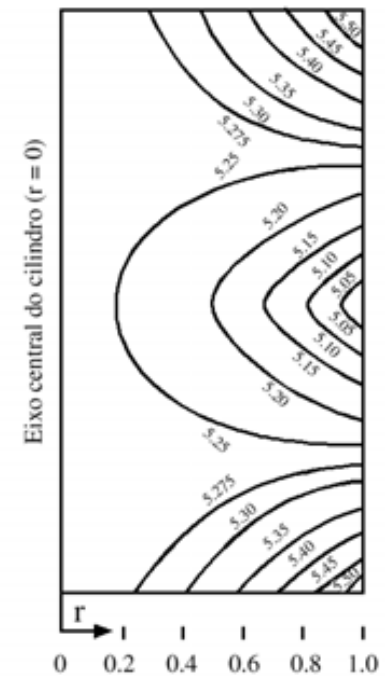
Defeitos e Problemas Associados à Prensagem Uniaxial



Coordenada radial adimensional (r/R)

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

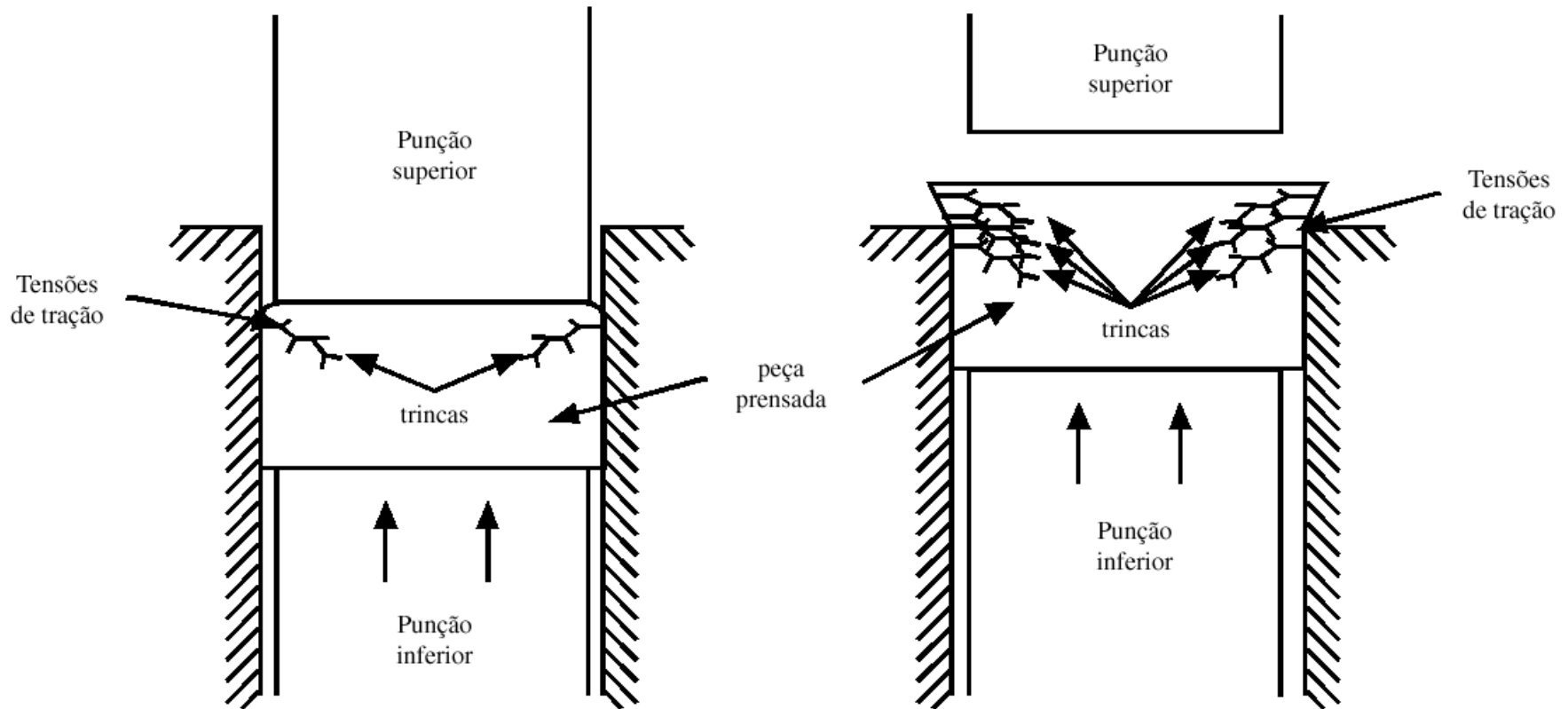
Ação simples



Coordenada radial adimensional (r/R)

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

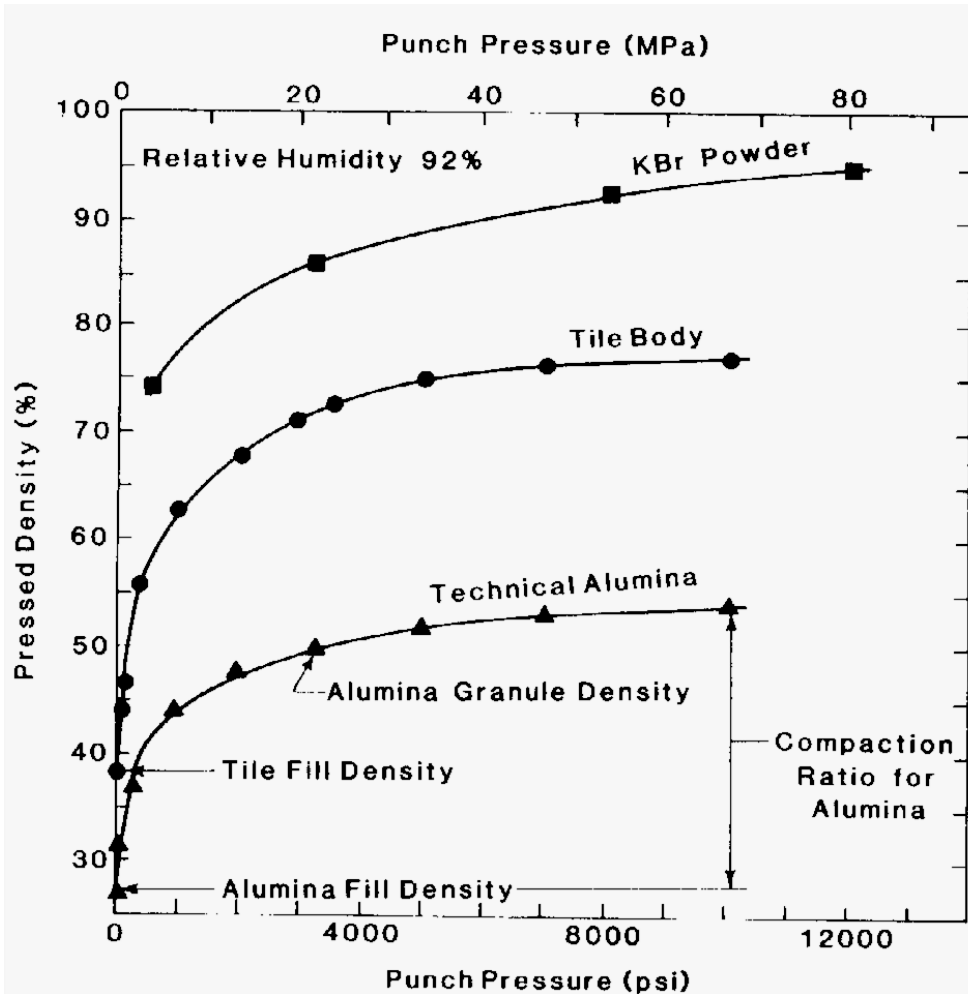
Recuperação elástica diferencial  tensões mecânicas

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]



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

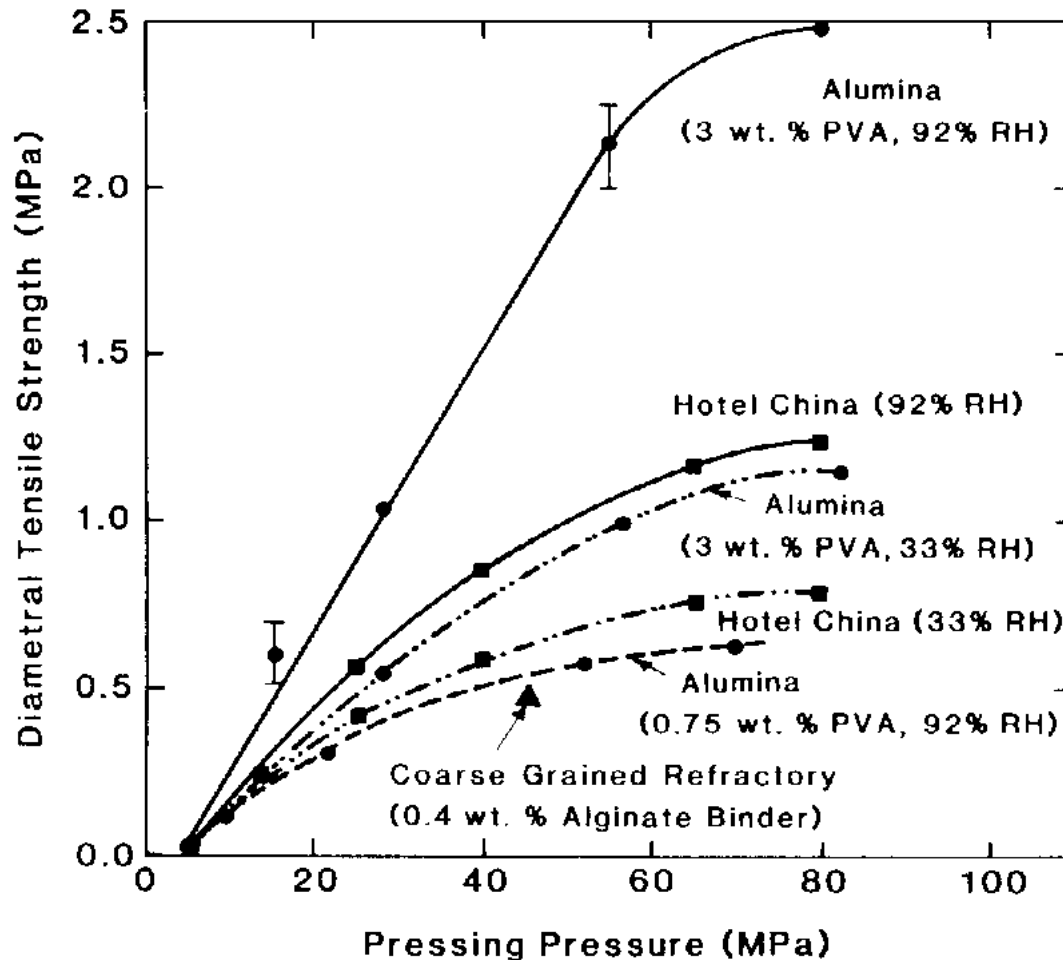
onde:

D_c = densidade do compacto

D_t - densidade teórica do pó

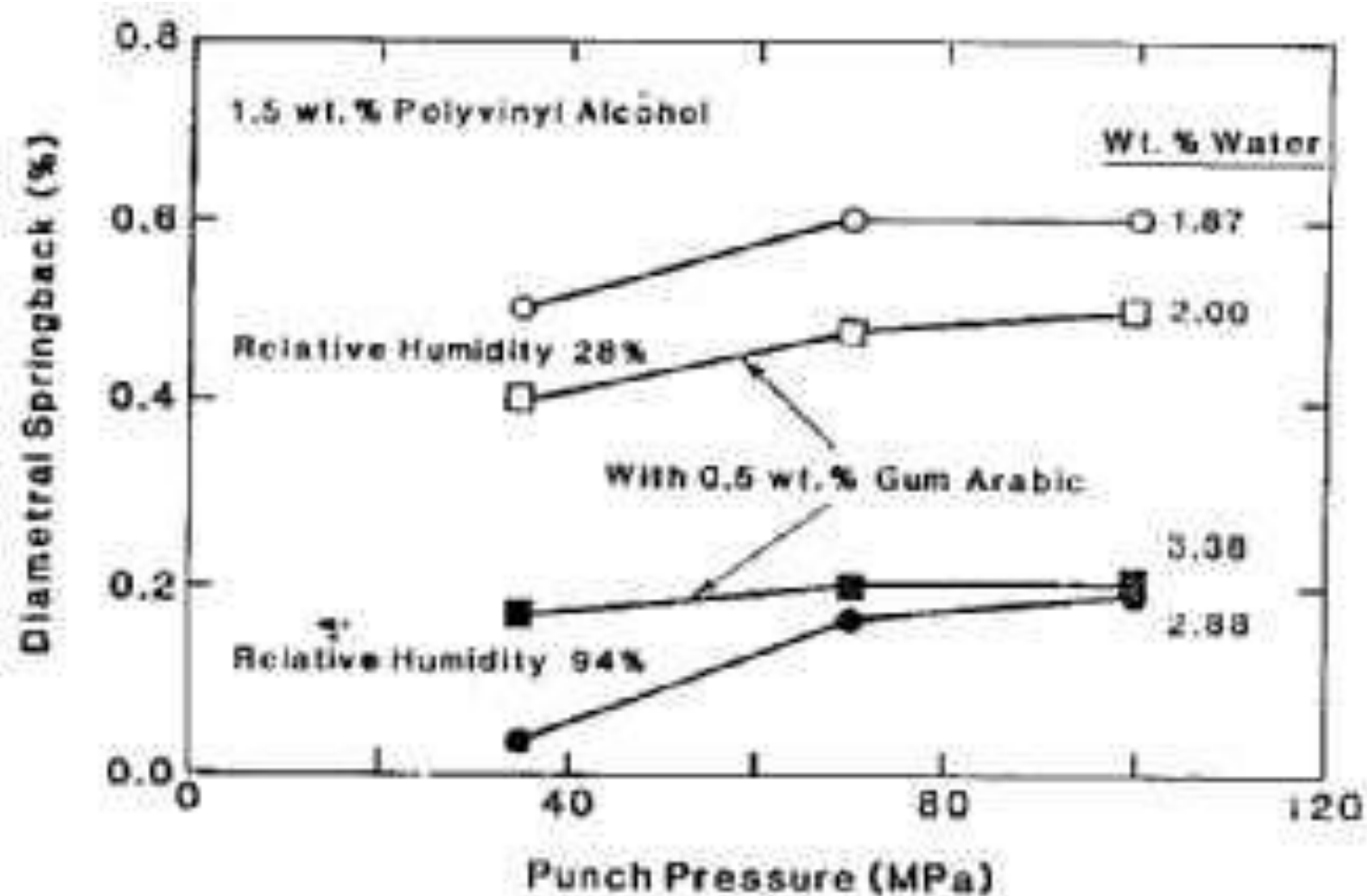
Influência da pressão de compactação e plastificação

[Reed, 1995:436]



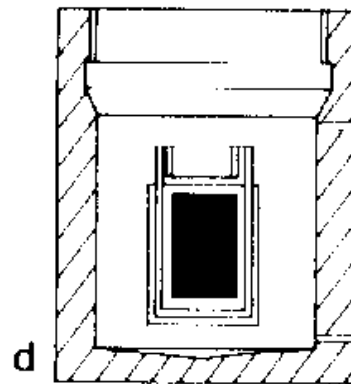
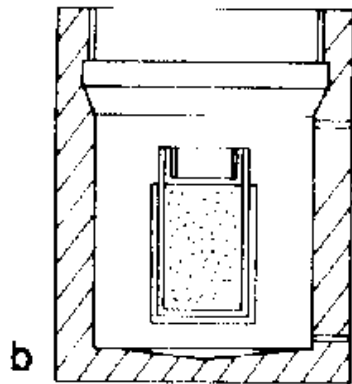
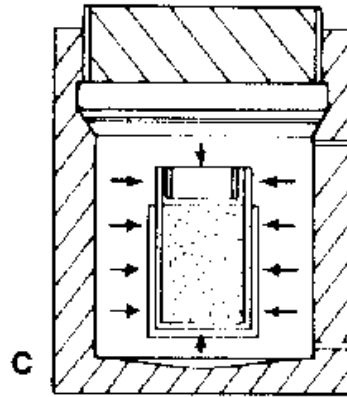
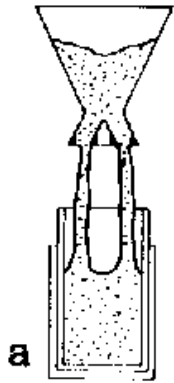
A resistência mecânica do compacto aumenta com a **pressão, teor de ligante e plastificante**;
RH = umidade relativa (%)

Recuperação elástica em função da pressão aplicada e adição de plastificantes



Prensagem isostática: *wet bag*

Wet Bag



Vantagens:

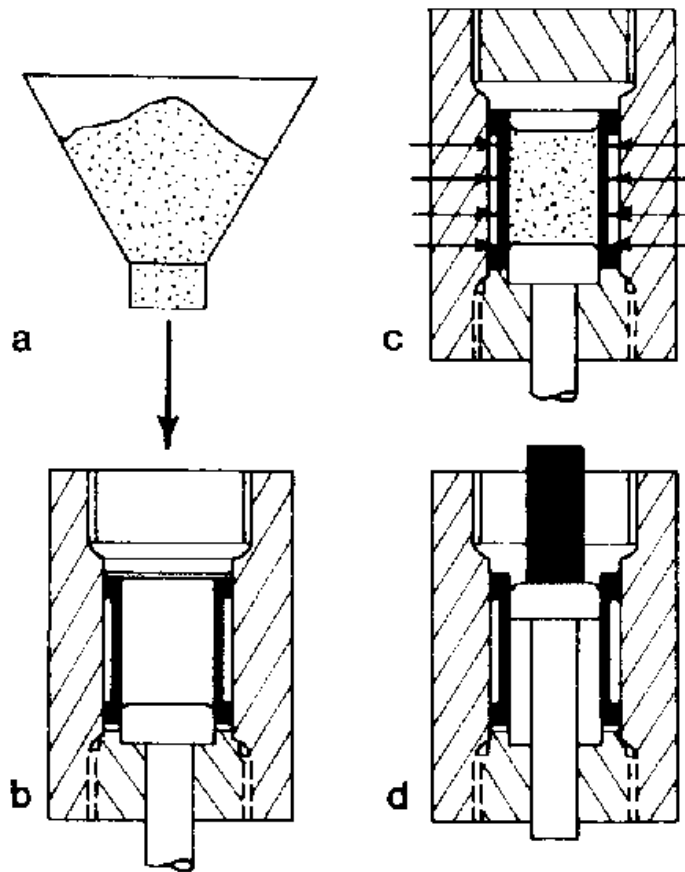
- ✓ Compactação homogênea
- ✓ Diversidade e complexidade de formas
- ✓ Baixo custo do molde

Desvantagens:

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

Prensagem isostática: *dry bag*

Dry Bag



- Pressão é aplicada radialmente pela ação do líquido sobre uma capa rígida
- Permite certa automatização do processo

Peças produzidas por prensagem isostática

Rods and Tubes up to 425mm long



Mill Balls And Hip Joints



Engine Valves for car engines

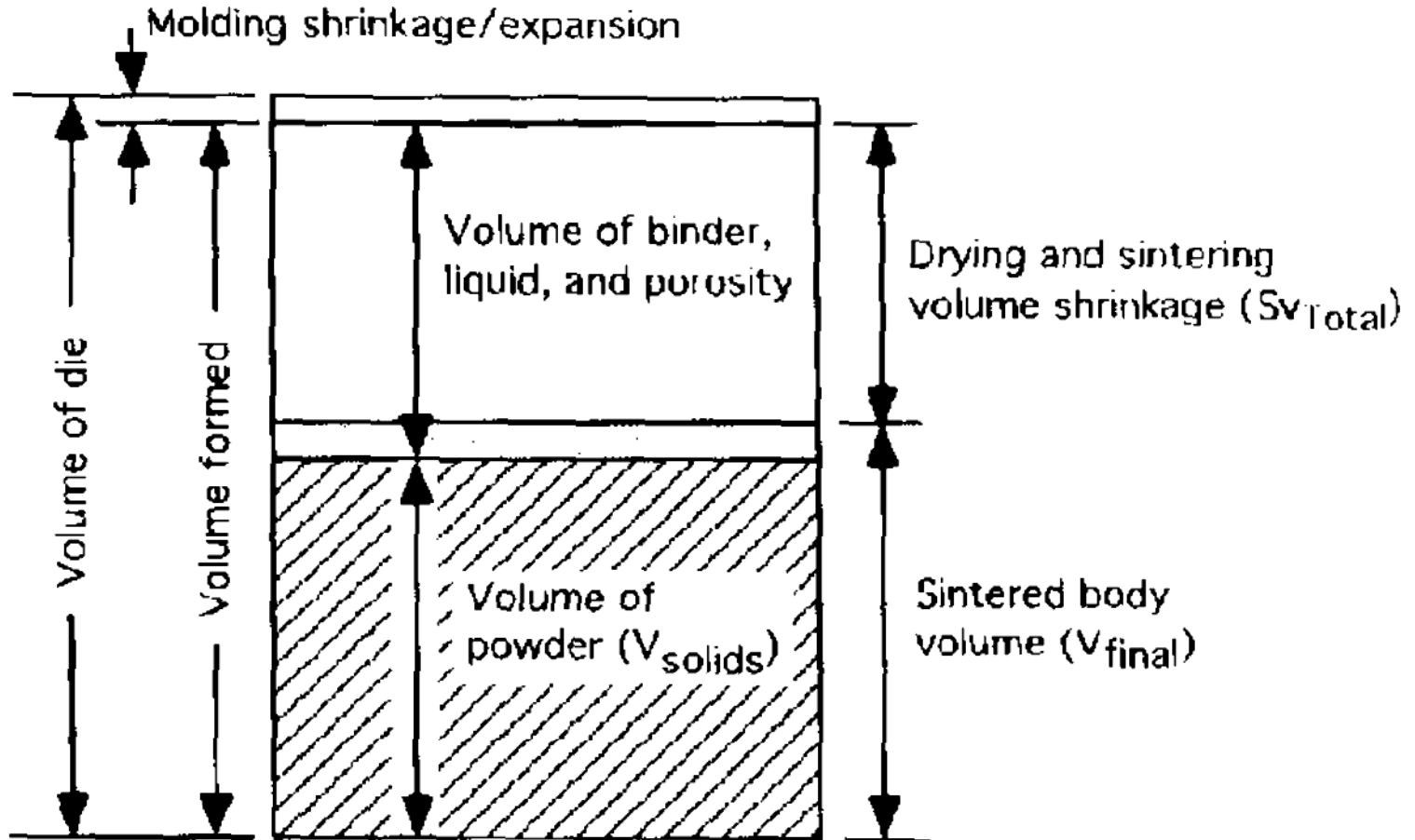
Some part tooling and moulding bags



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**

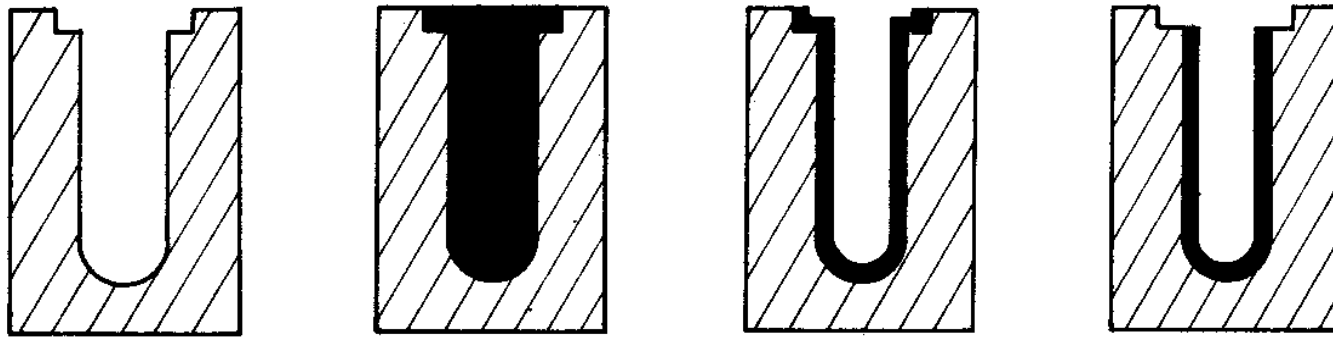
Desvantagens:

- ✓ **Baixa produtividade**
- ✓ **Precisão dimensional difícil de ser controlada**

2.Colagem de barbotina

Colagem de barbotina

[Reed, 1995:493]

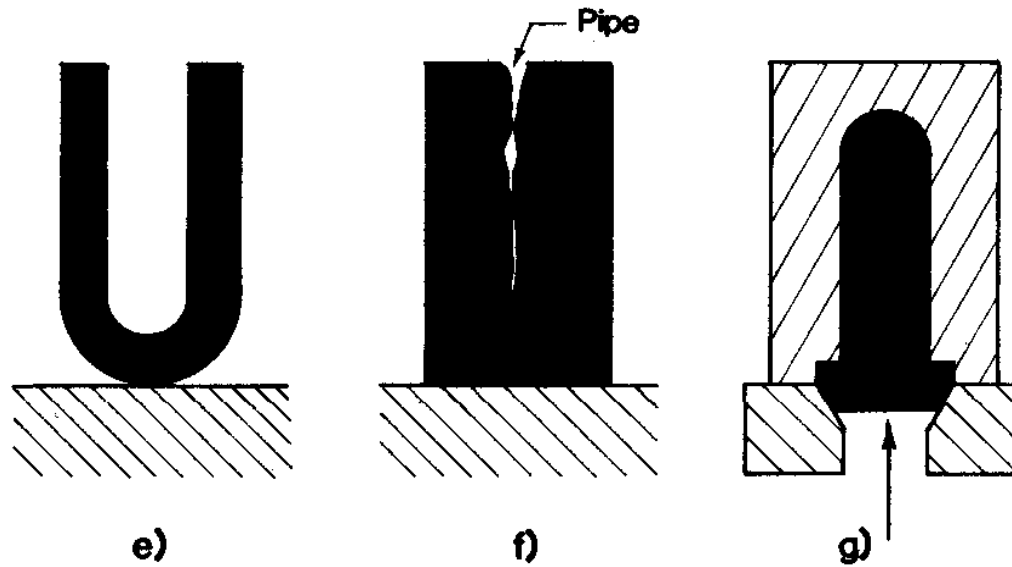


a)

b)

c)

d)

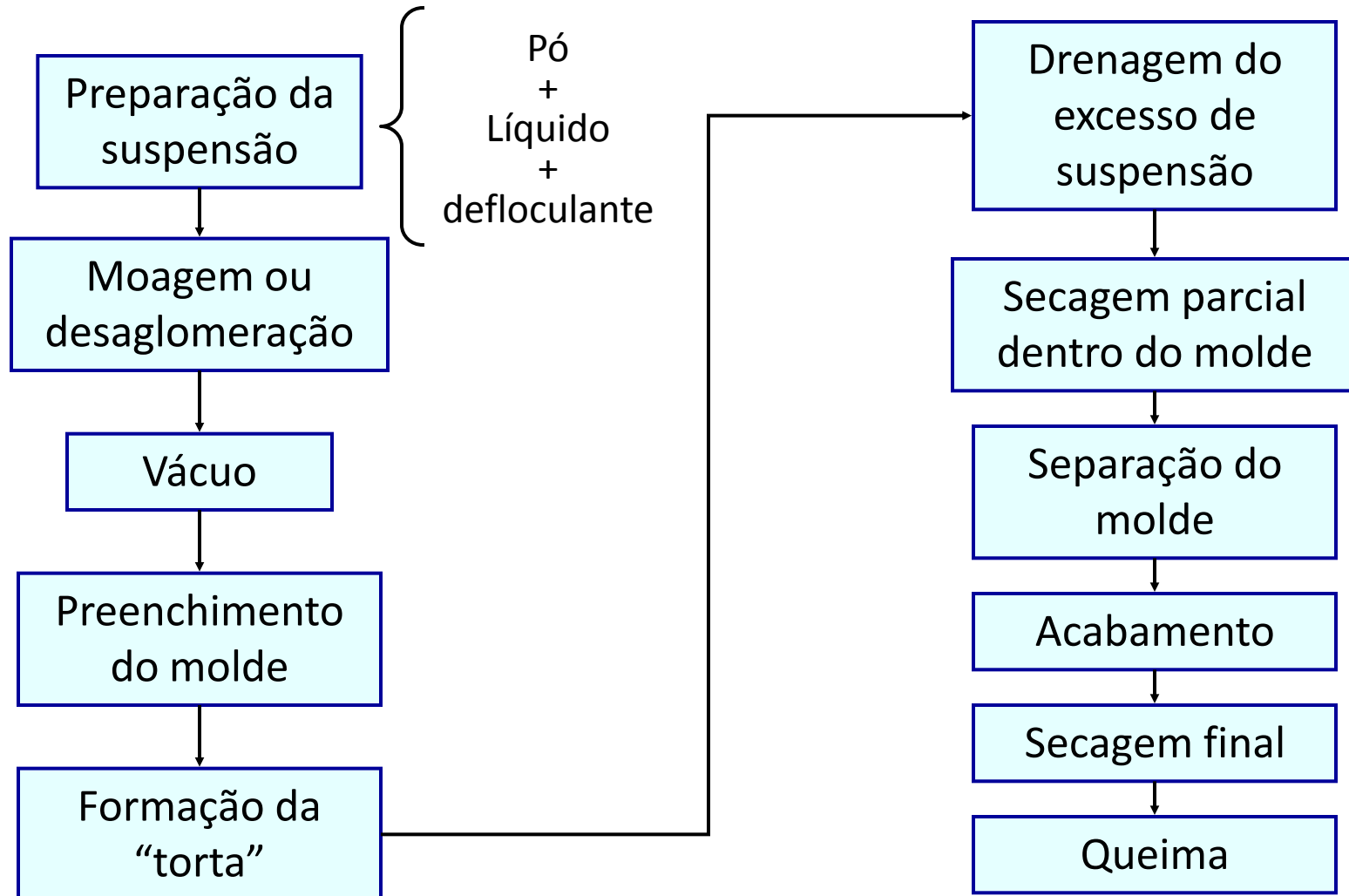


e)

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]

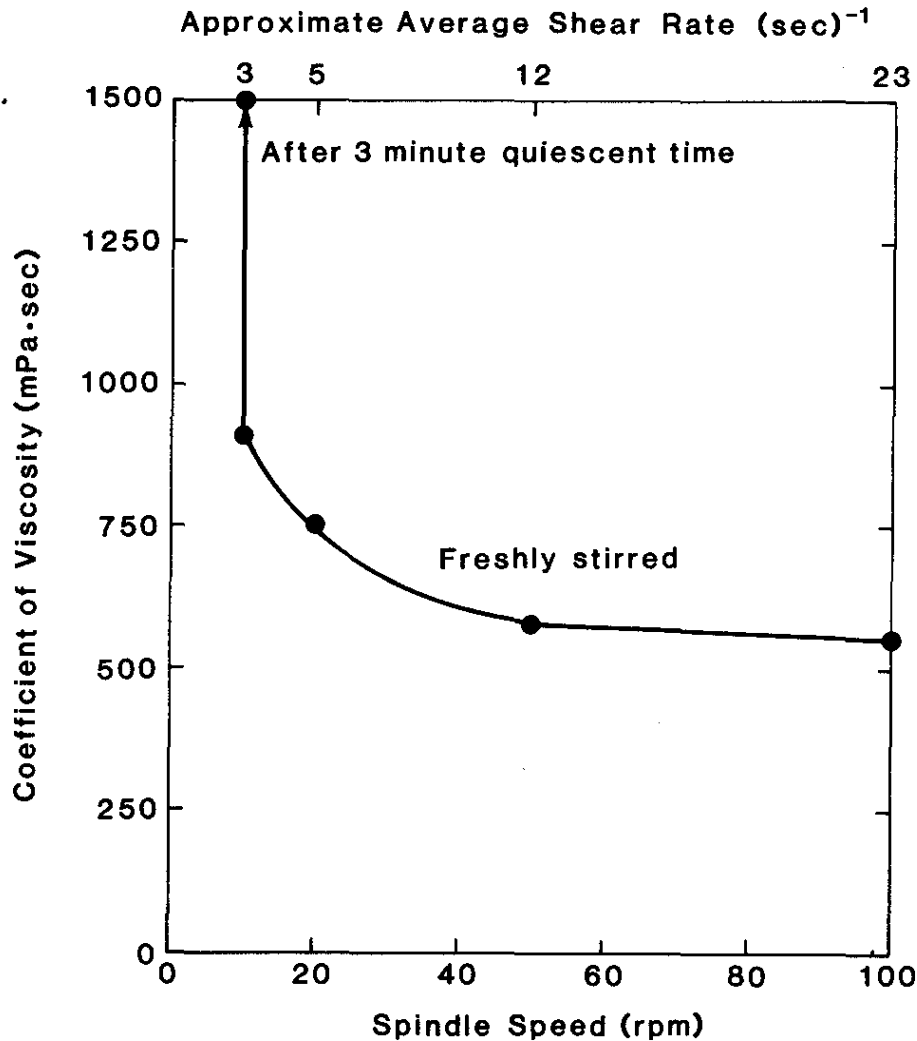
Processo	Molde	Características	Produtos
Colagem de barbotina	Gesso/polímero poroso	Variedade de formas, facilidade de instalação, mecanização disponível	Refratários, tubos fechados, produtos avançados/tradicionais
Colagem de folhas	Lâmina metálica	Produção em massa	Substratos finos
Colagem de gel	Molde 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

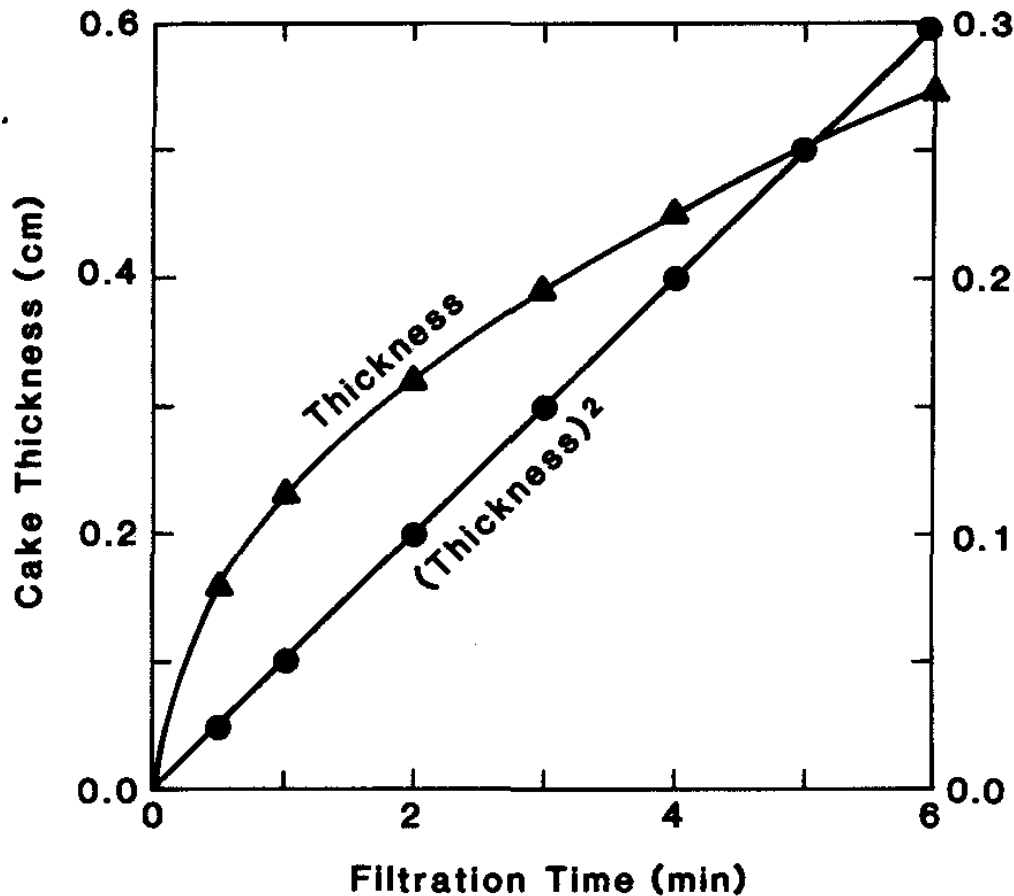
Comportamento reológico da suspensão: tixotrópico



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]



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

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

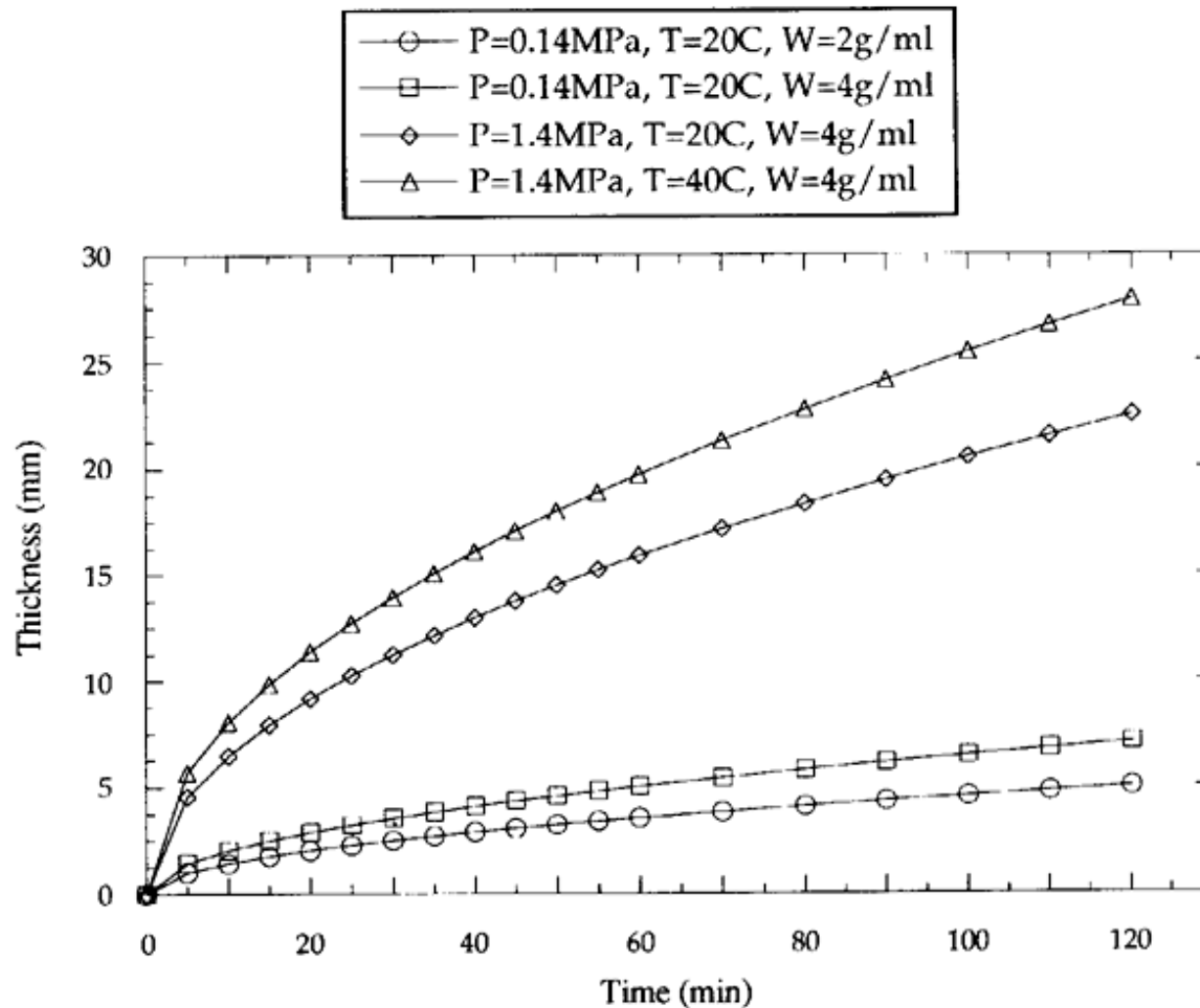
R_c = permeabilidade da torta

ΔP = pressão de sucção do molde

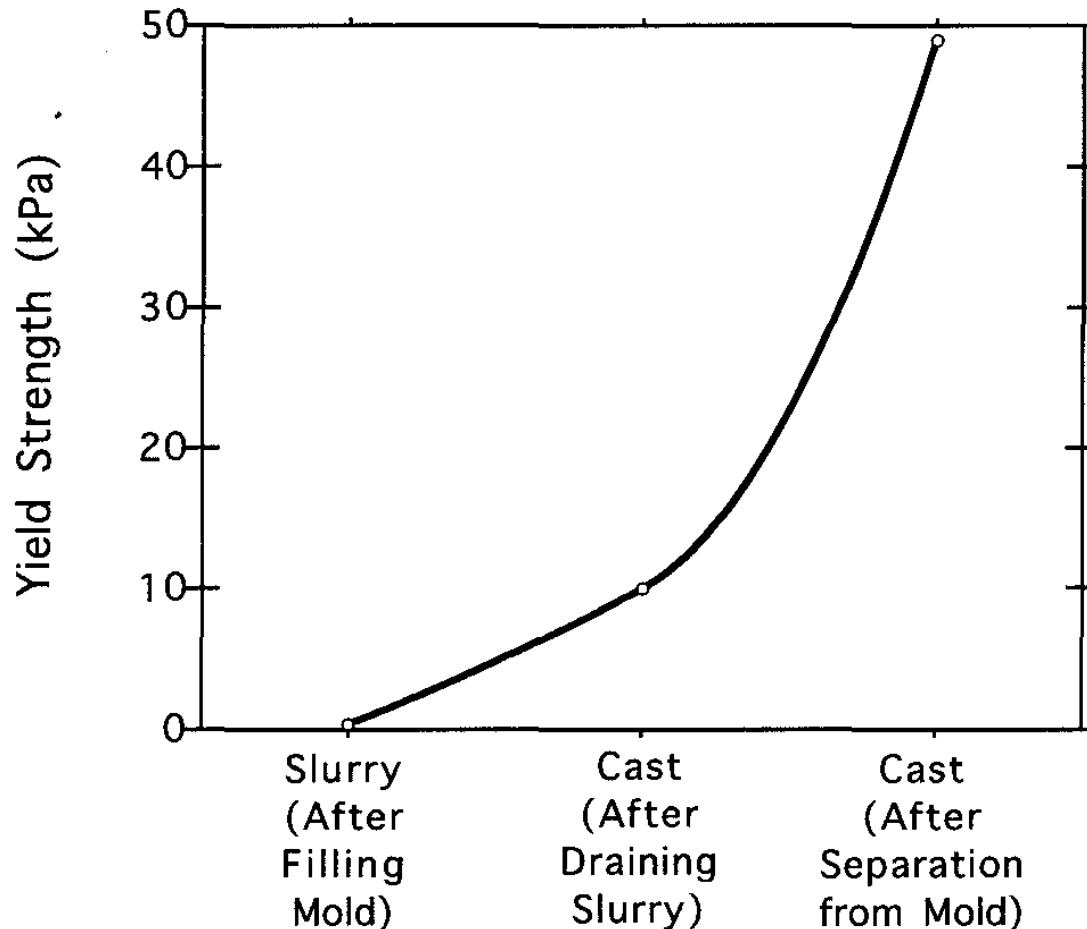
η = viscosidade do líquido

Efeitos de pressão, temperatura e teor de sólidos

[Reed, 1995:499]

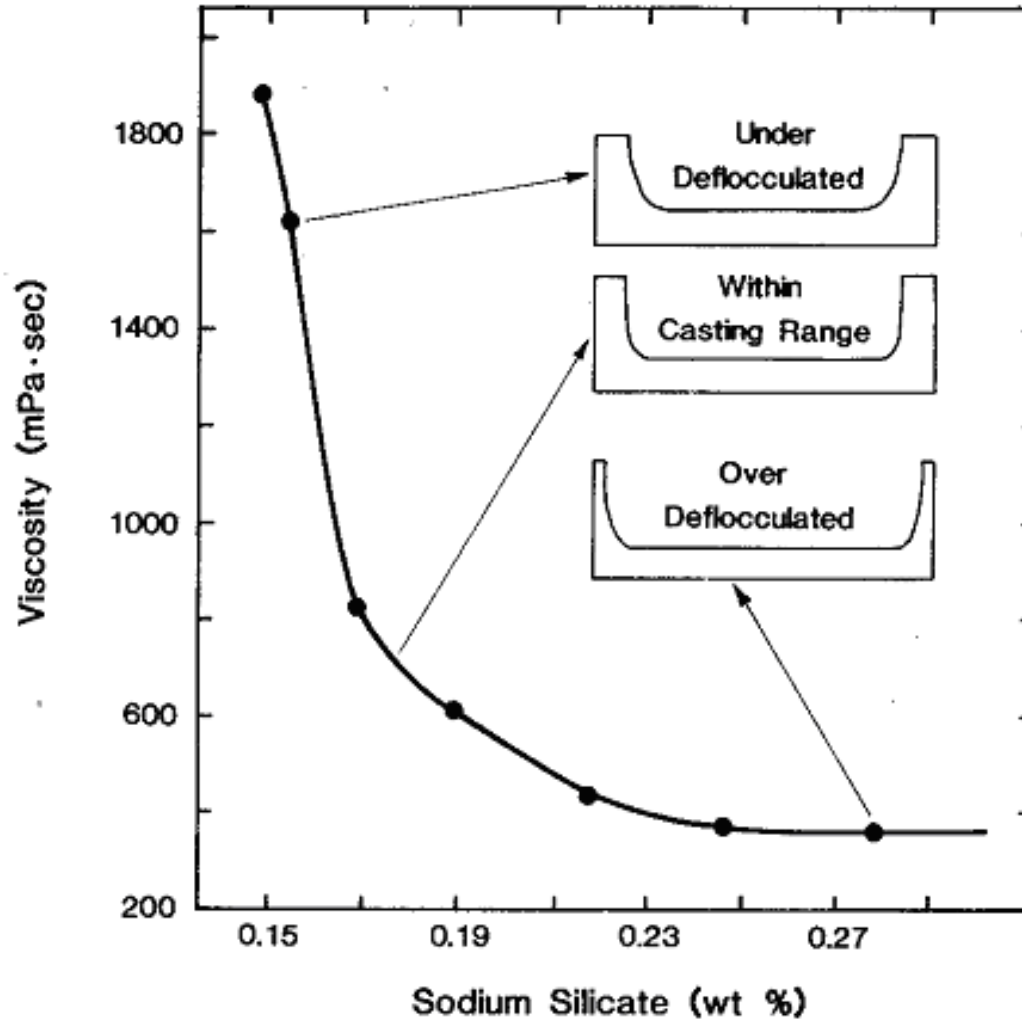


Tensão de escoamento em cada etapa do processo de colagem



Efeito do defloculante

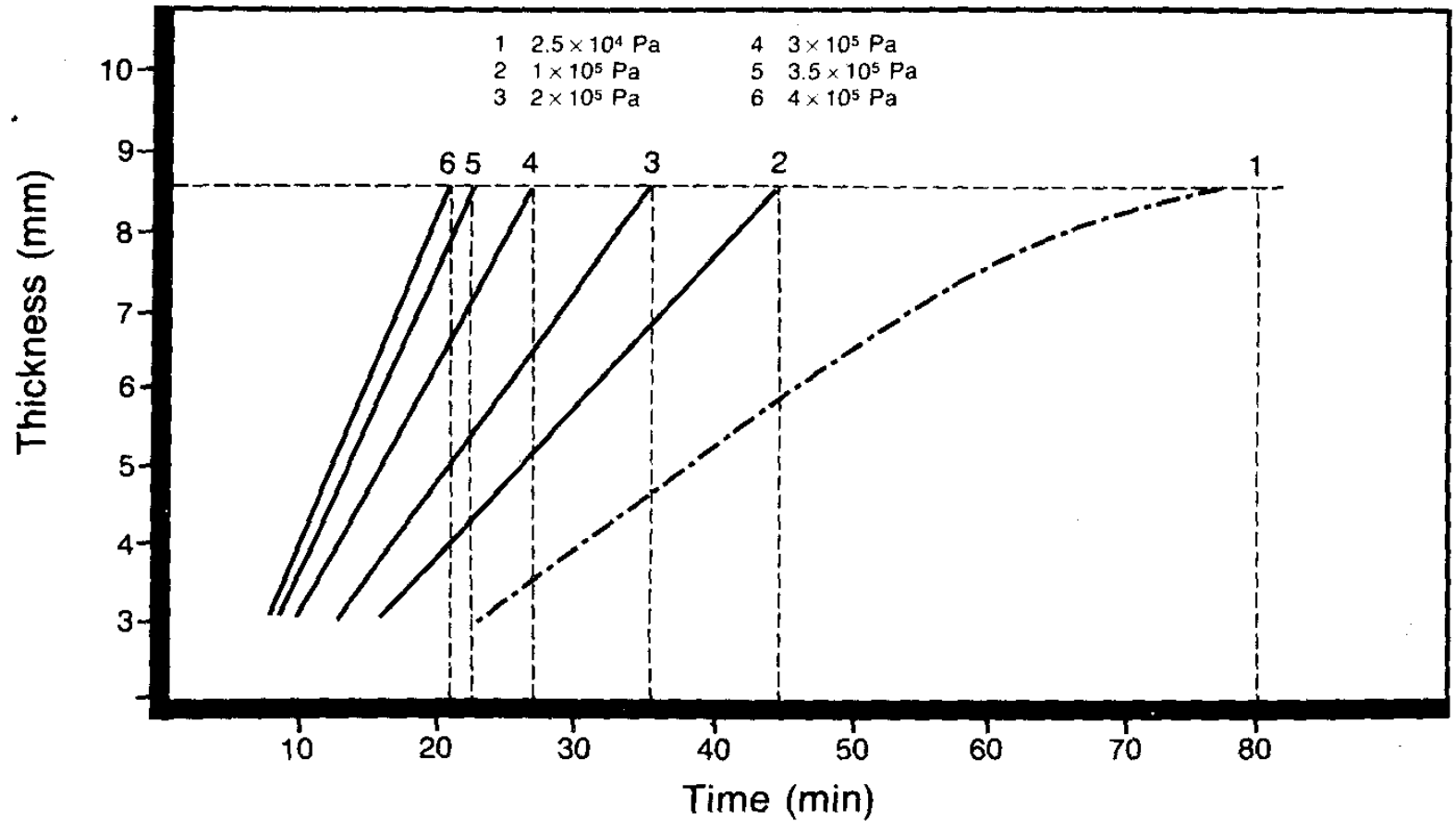
[Reed, 1995:501]



Colagem sob pressão



Colagem sob pressão

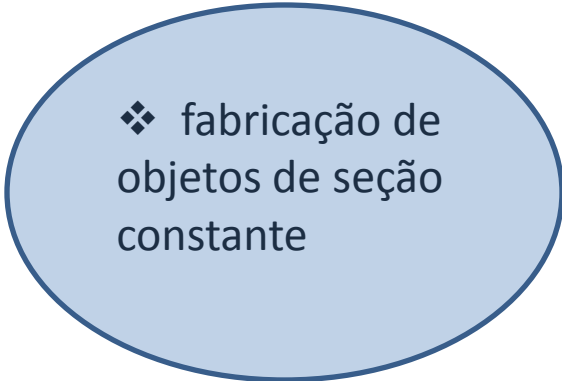


3. Conformação plástica

EXTRUSÃO E INJEÇÃO

Produtos fabricados por **Extrusão**

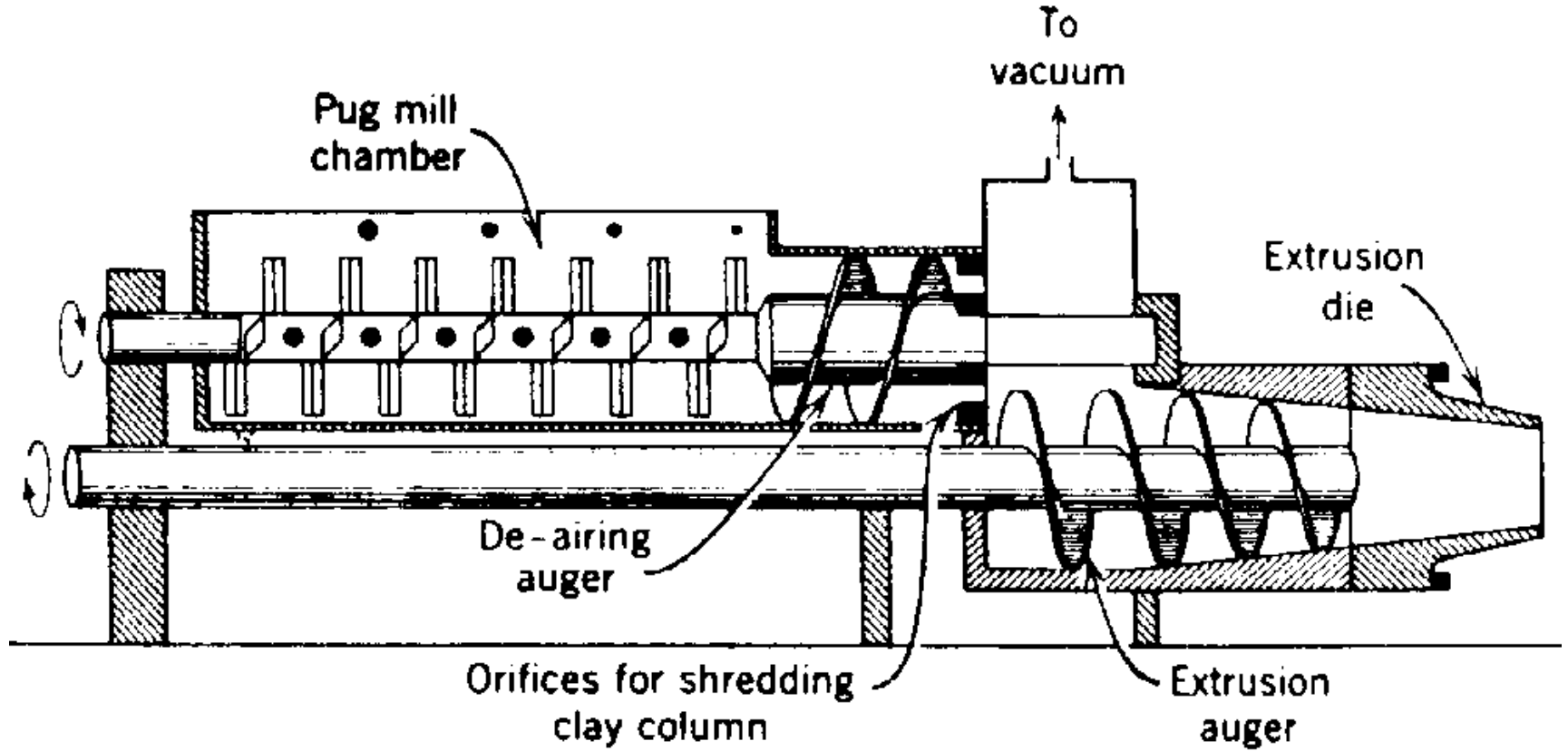
- ★ Blocos de construção civil
- ★ Tubos de cerâmica vermelha (manilhas)
- ★ Peças refratárias:
 - tubos para proteção de termopares
 - tubos para fornos
 - tubos para trocadores de calor
 - mobília de forno
- ★ Isoladores elétricos de porcelana
- ★ Tubos cerâmicos translúcidos para lâmpadas



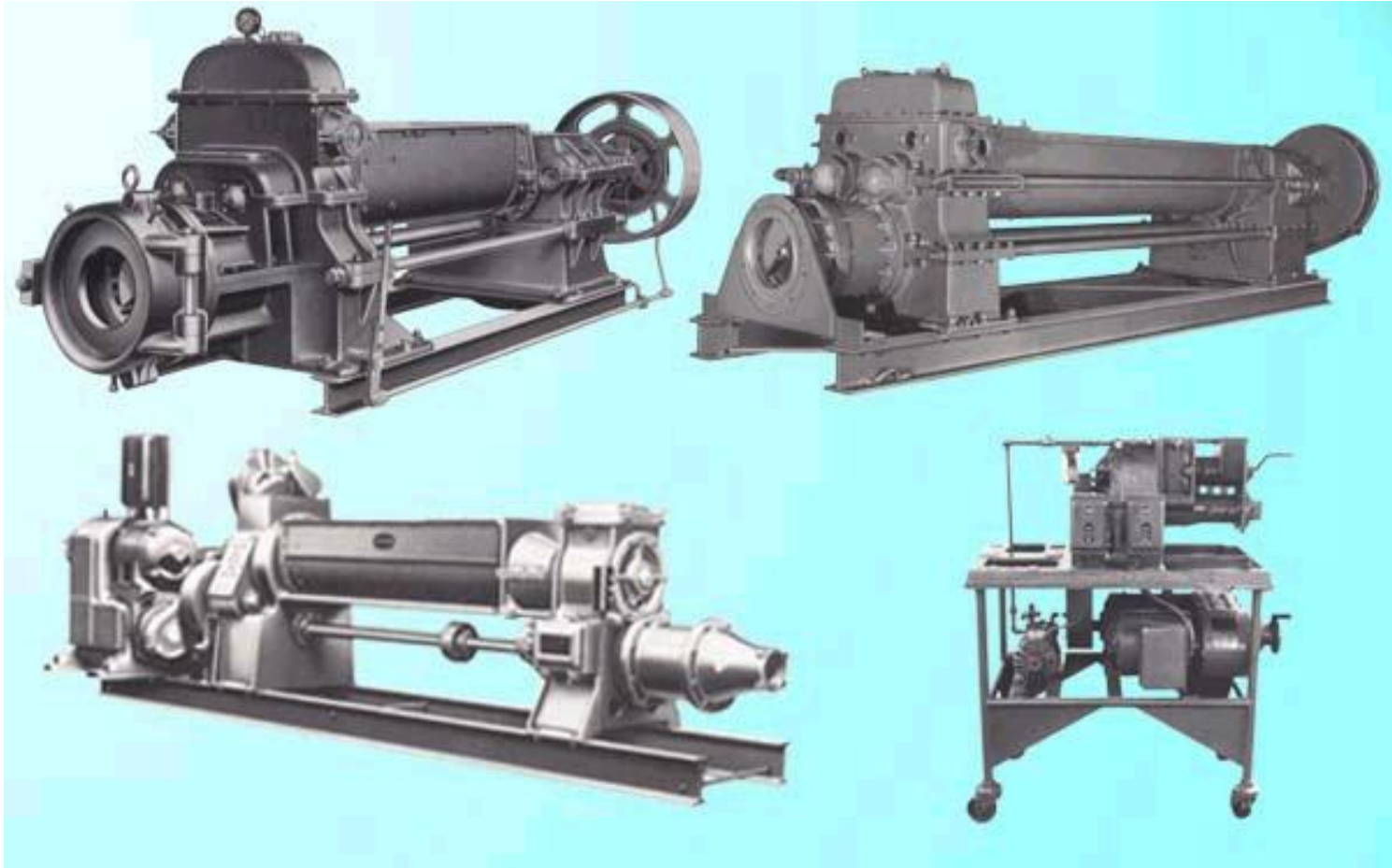
❖ fabricação de objetos de seção constante

Extrusora: ilustração esquemática

[Reed, 1995:452]



Exemplos de extrusoras

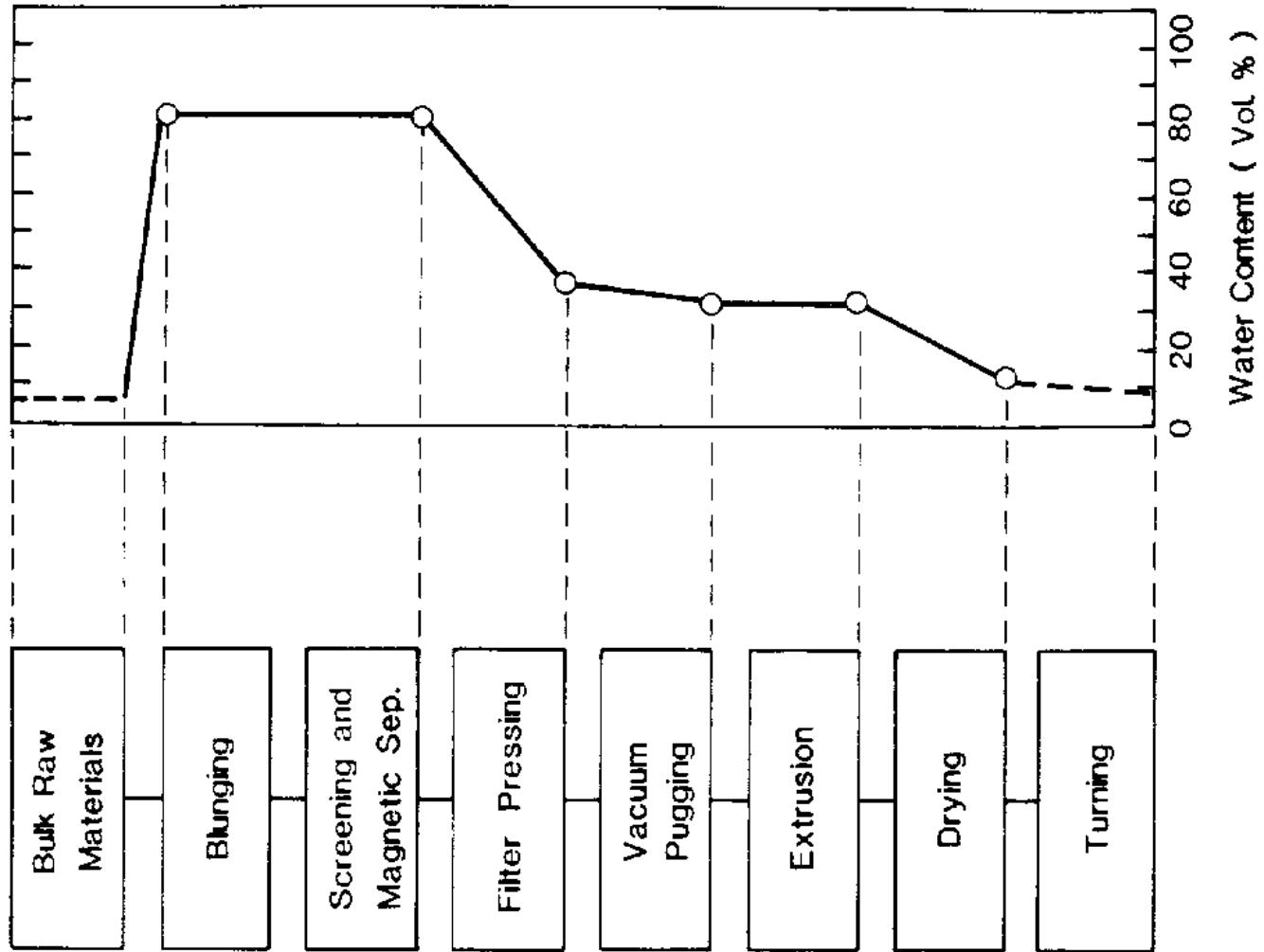


Exemplos de geometrias de boquilhas usadas na extrusão



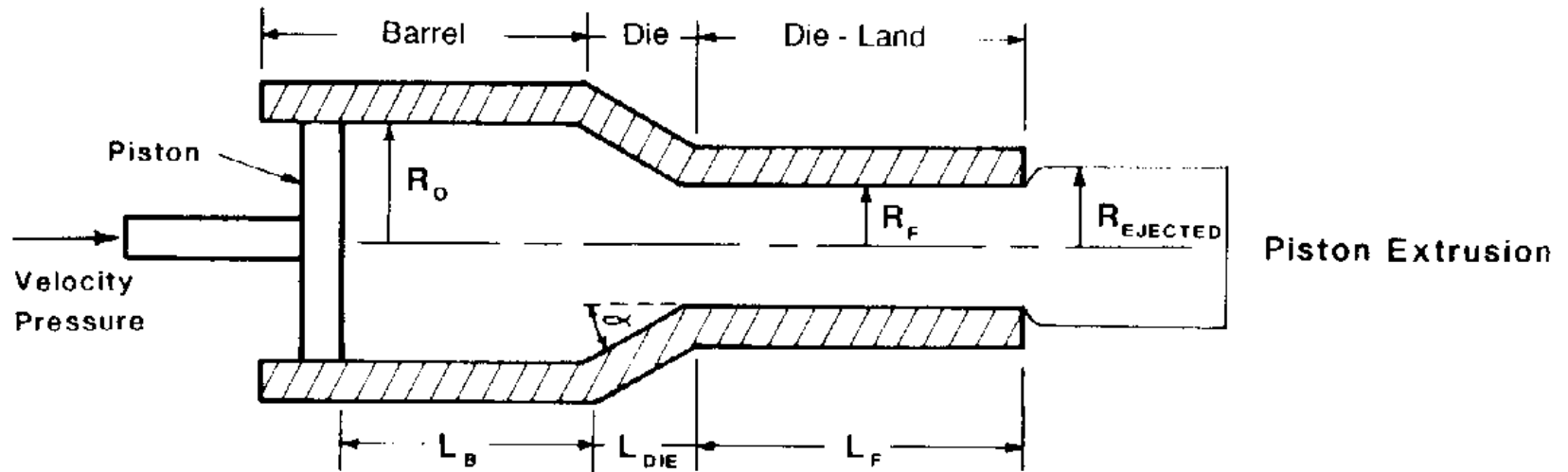
Variação do teor de líquido durante processamento

[Reed, 1995:453]



Extrusoras de pistão

[Reed, 1995:453]

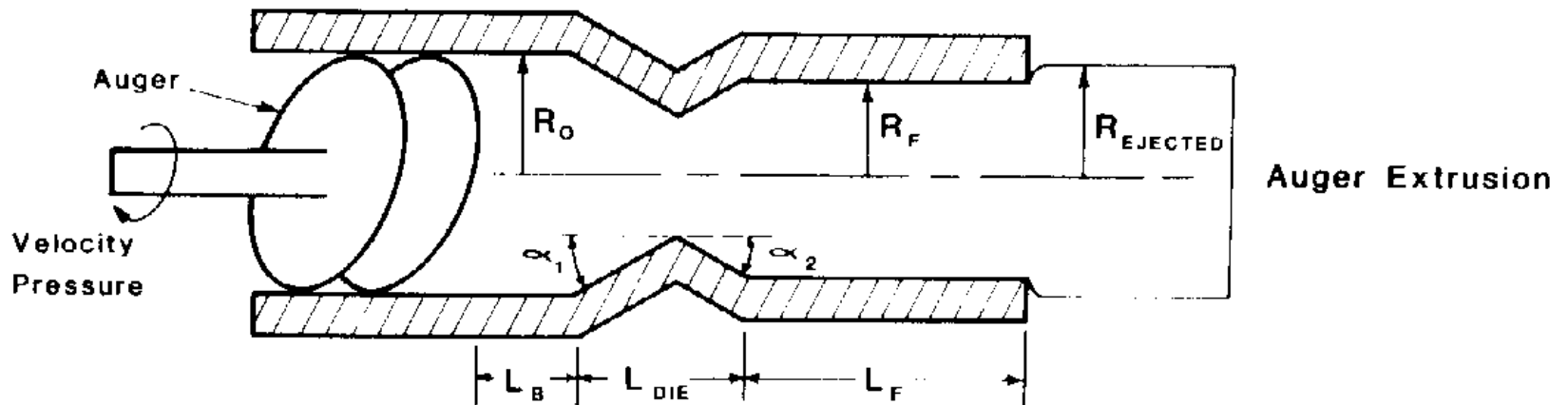


Alimentação: blocos de massa plástica desaerada

Pressões elevadas são geradas

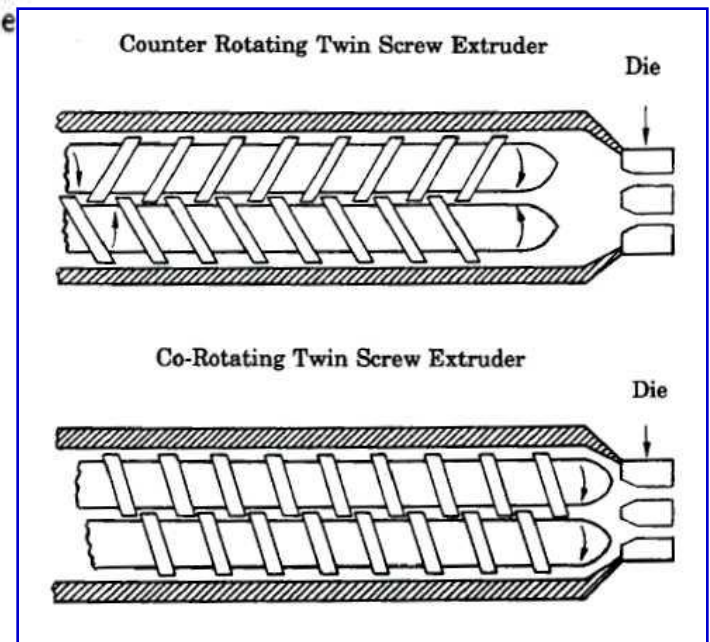
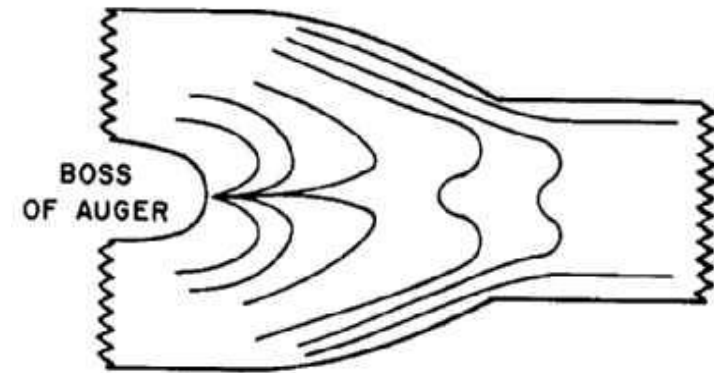
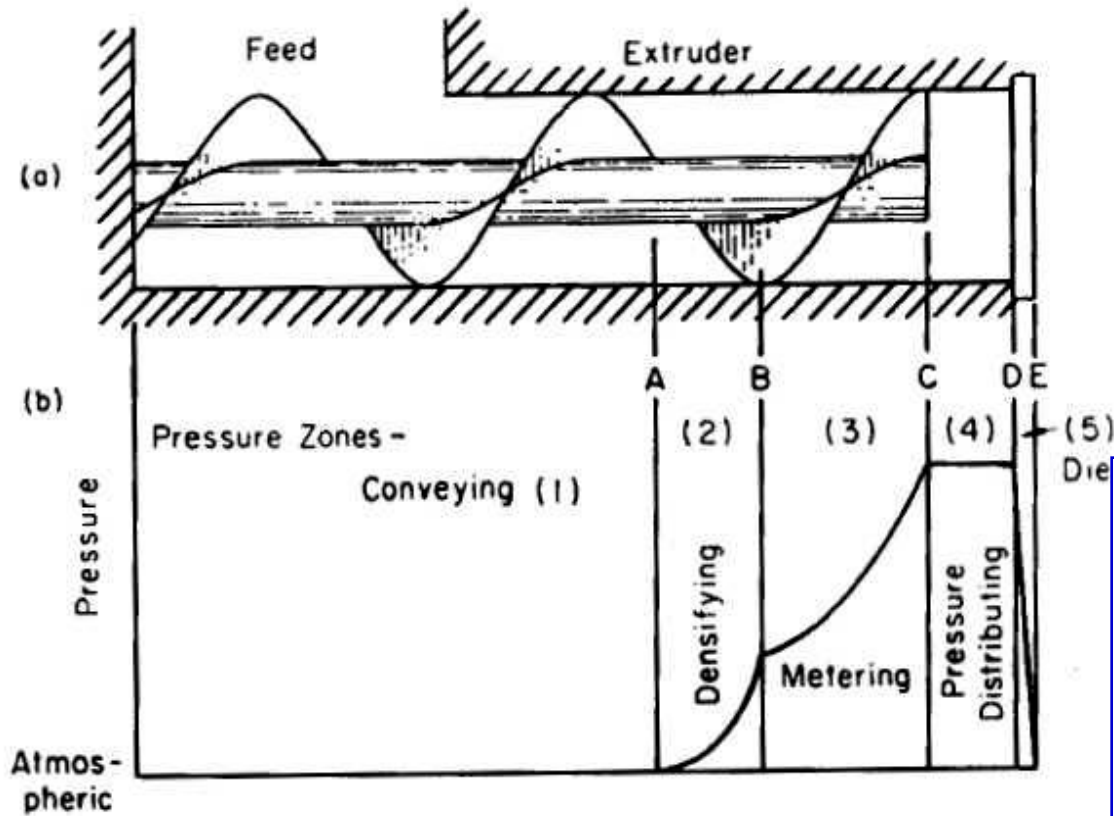
Processo intermitente - baixa produtividade

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

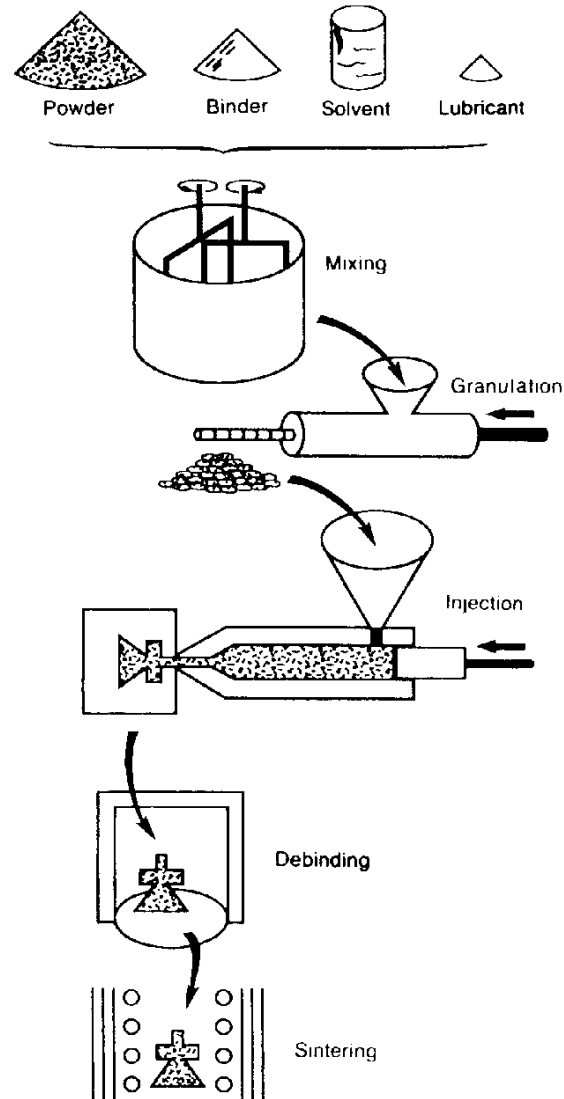
Injeção

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

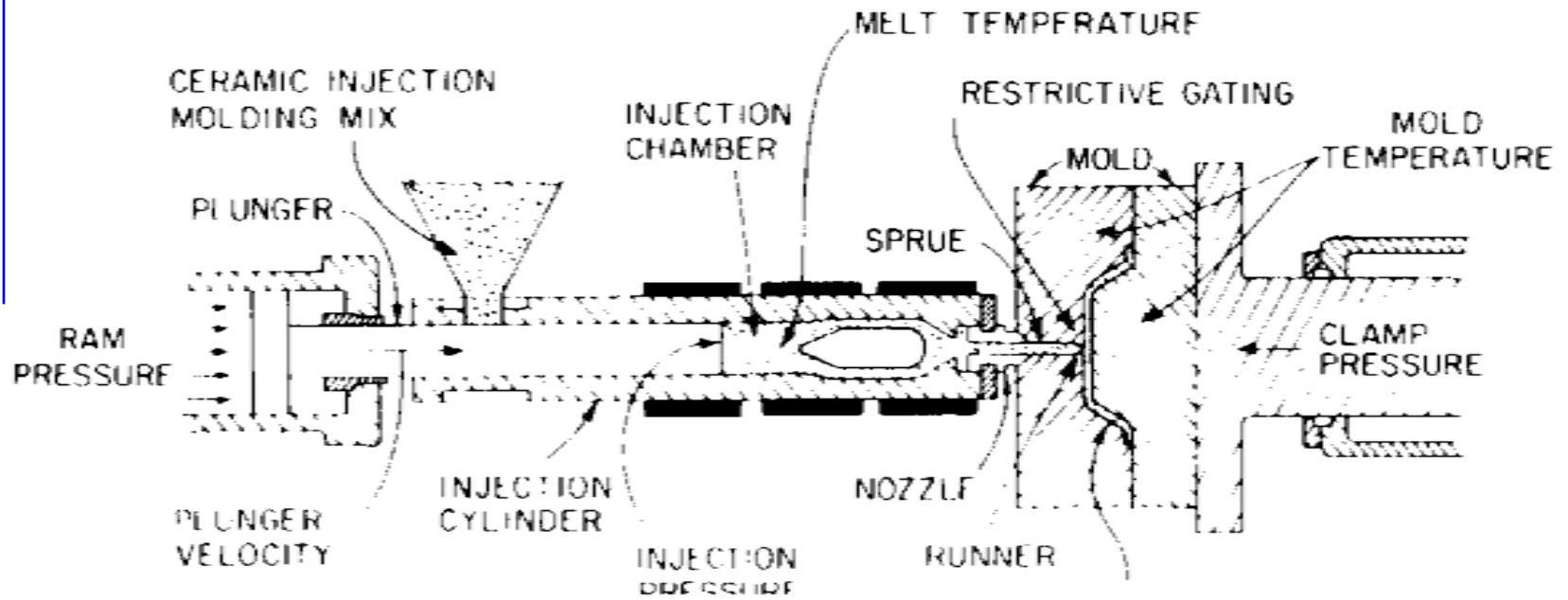
Esquema de moldagem por injeção

[Reed, 1995:478]



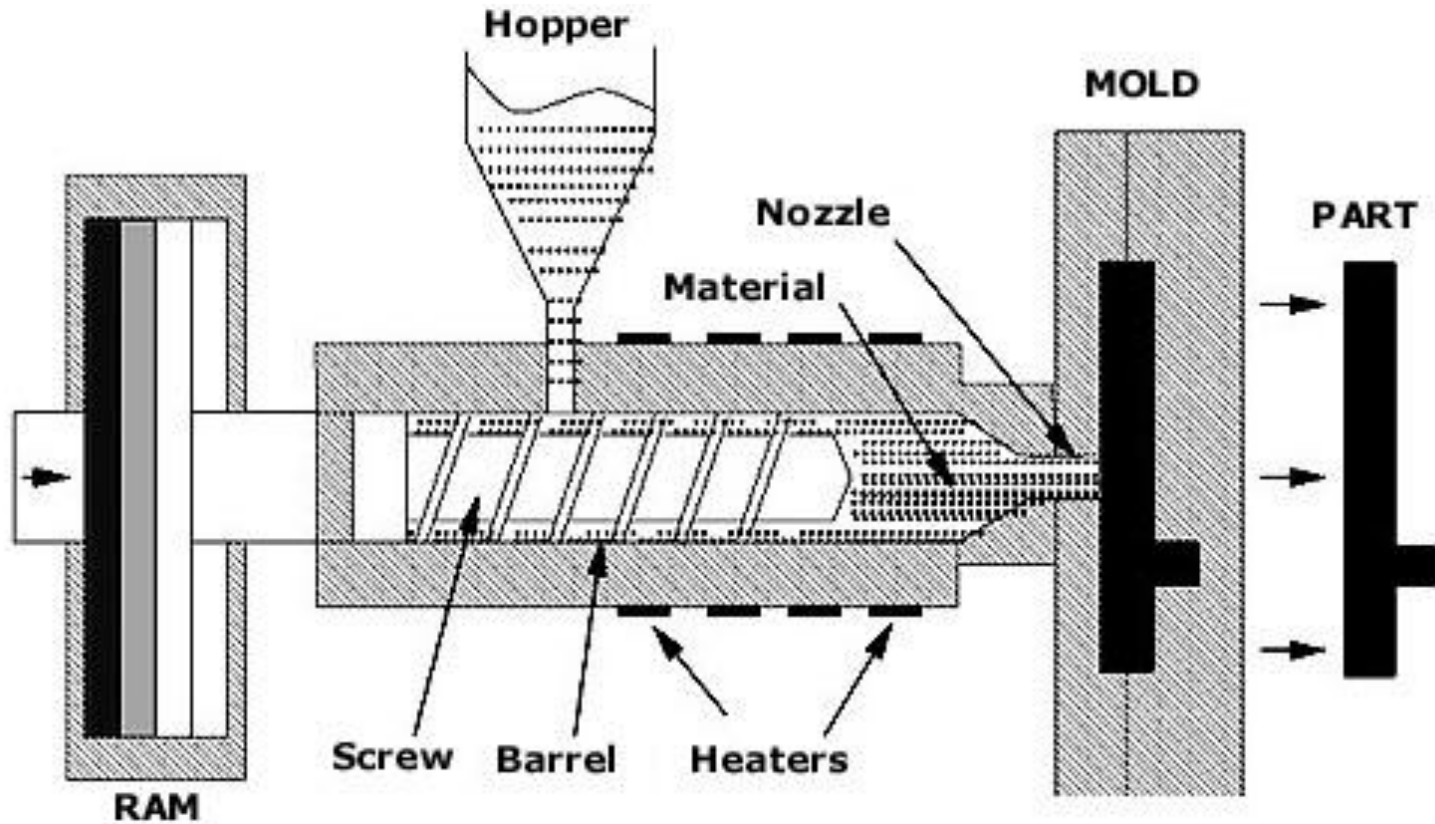
Injetora

[Reed, 1995:481]



Injetora

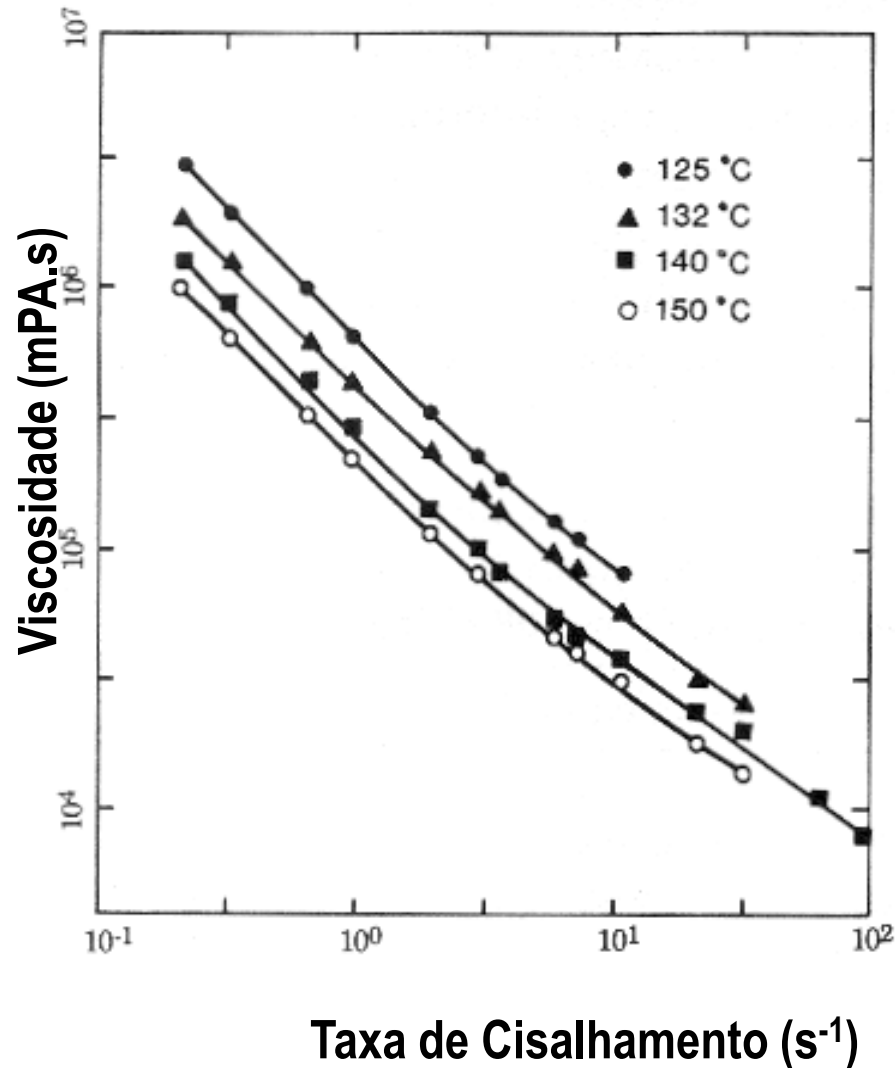
[Reed, 1995:481]



Injetora



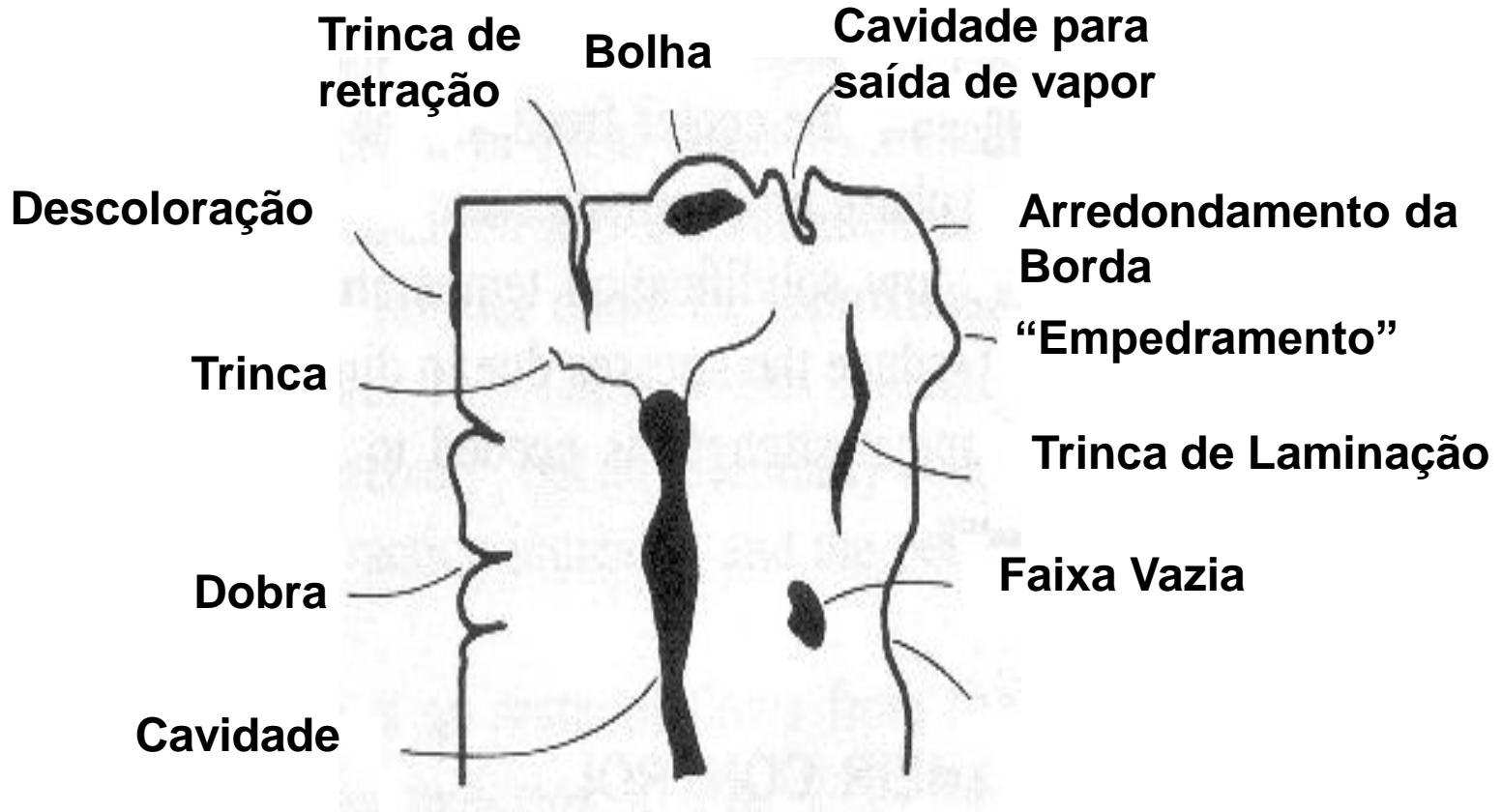
Comportamento reológico de massa para injeção



Fluido de Lei de Potência

$$\eta = \mathbf{K} \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$$

Defeitos



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