



Departamento de Engenharia de Materiais (SMM)
Escola de Engenharia de São Carlos (EESC)
Universidade de São Paulo (USP)

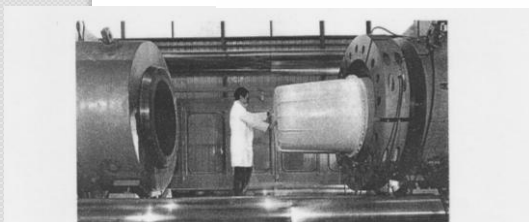
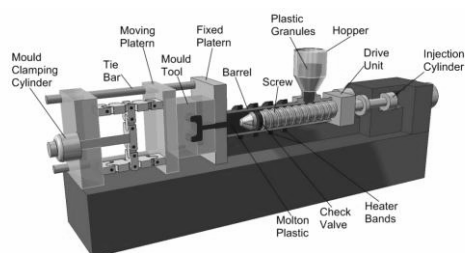
SMM0315 – Processamento de Materiais IX: Polímeros

Docente: Marcelo A. Chinelatto

Março – Julho de 2025

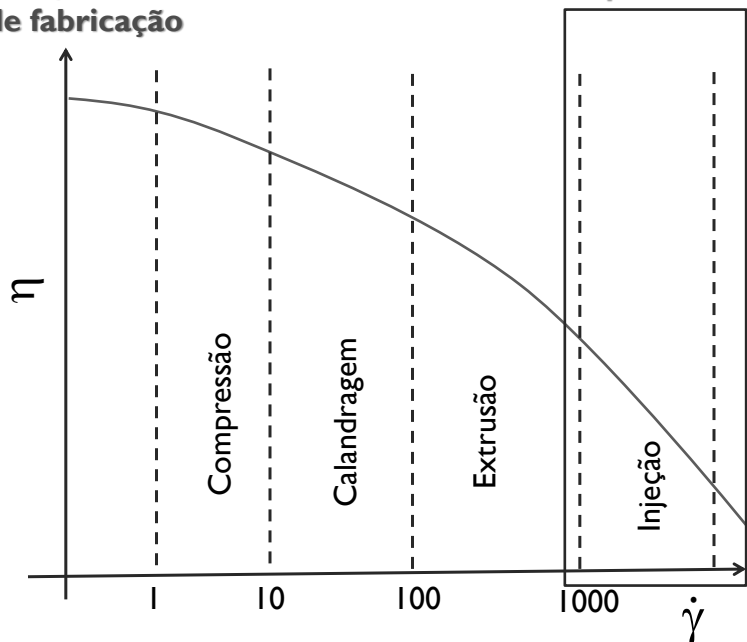
1

Moldagem por Injeção



2

Relação entre taxas de cisalhamento e processos de fabricação

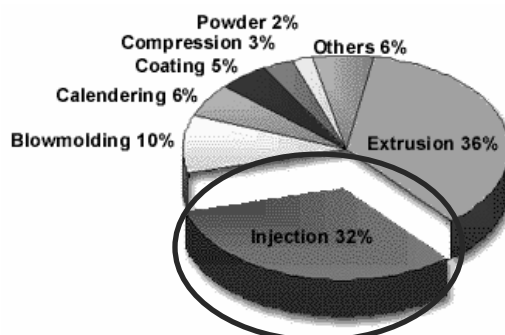


3

Moldagem por Injeção

- A **moldagem por injeção** é uma das mais importantes técnicas de processamento de polímeros para a produção de peças de custo mais baixo, em grande volume, de menor peso e de formas mais complexas.

Principais Técnicas de Processamento de Polímeros



4

Moldagem por Injeção

- Entretanto, devido ao alto custo das máquinas, a alta produtividade é um fator chave para tornar esse processo viável, sendo o **tempo de ciclo** o gargalo do sistema.

Os itens indispensáveis para uma moldagem consistente são:

- máquina adequada para plastificar e injetar o polímero;
- polímero adequado para obter um desempenho satisfatório da peça moldada;
- molde com dimensionalidade e remoção da peça adequadas;
- condições de processo adequadas para gerar um **ciclo de moldagem eficiente**.

5

Moldagem por Injeção



> 3 milhões/ano



> 12 milhões/ano



> 500 milhões/ano

6

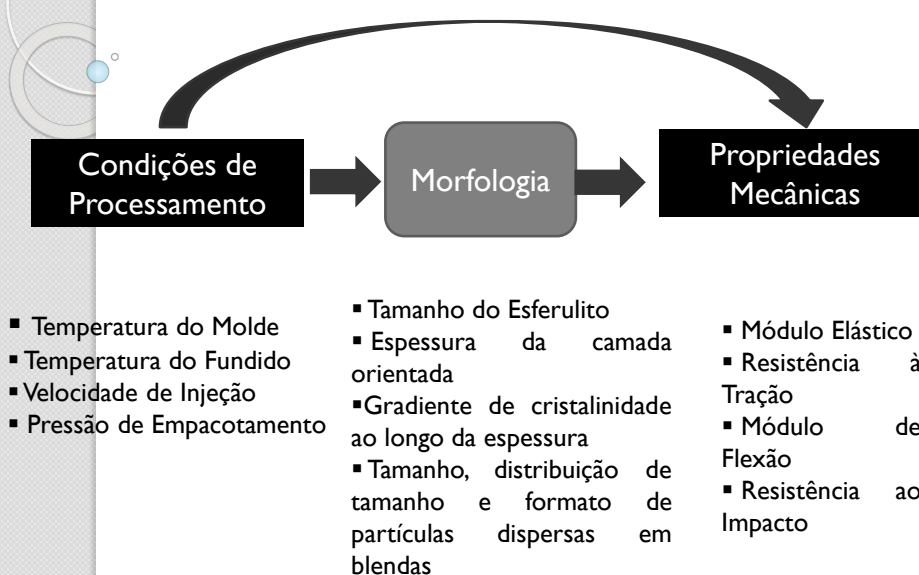
Moldagem por Injeção



> 1 bilhão/ano

7

Moldagem por Injeção

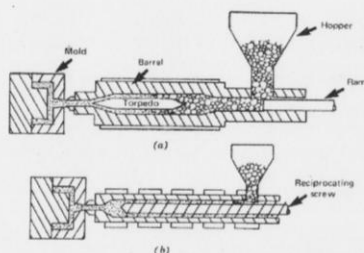


8

Técnica de Moldagem por Injeção

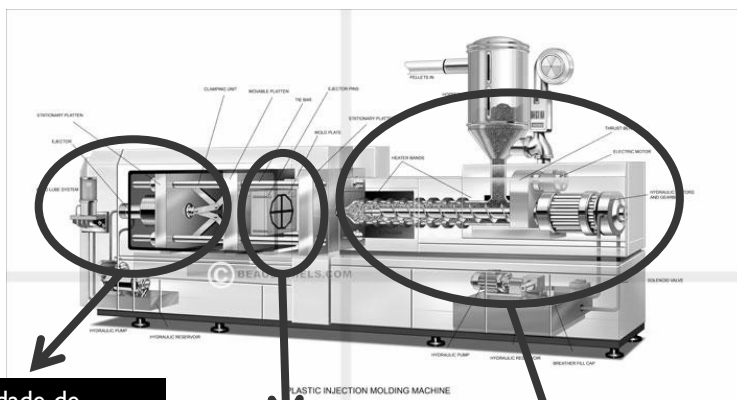
Considerações sobre a técnica

A moldagem por injeção consiste basicamente na redução da viscosidade de polímeros através da aplicação de calor e cisalhamento, sendo posteriormente pressionado para dentro da cavidade de um molde, compactado e resfriado até a completa solidificação da peça.



9

Princípio de Funcionamento de uma Injetora



Unidade de
fechamento

Unidade do molde

Unidade de Injeção

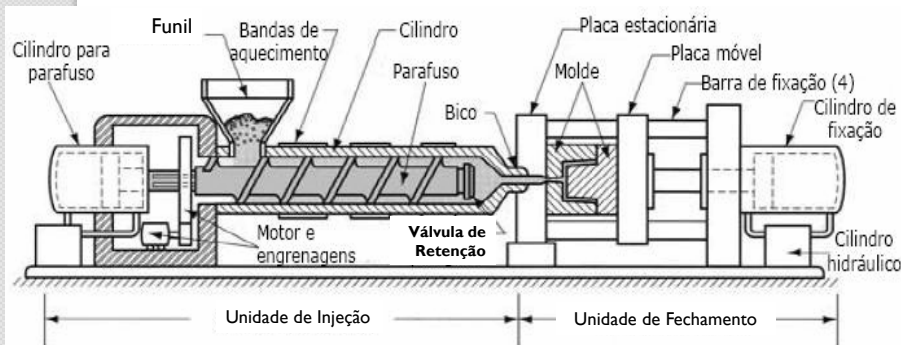
10

Princípio de Funcionamento de uma Injetora

Dois componentes principais:

° *Unidade de injeção* – funde e “entrega” o polímero fundido (funciona como uma extrusora).

Unidade de Fechamento – abre e fecha o molde em cada ciclo de injeção.

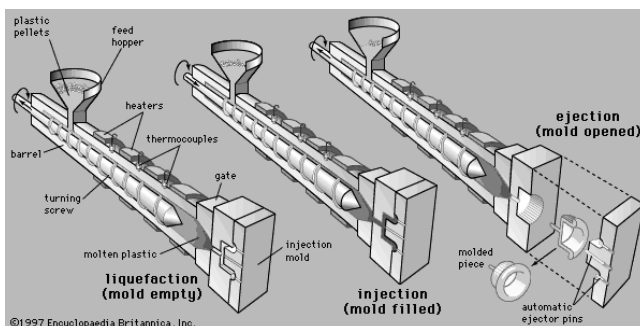


11

Princípio de Funcionamento de uma Injetora

Partes da Máquina

1. Funil
2. Cilindro hidráulico de injeção
3. Motor da rosca
4. Barril
5. Bico de Injeção
6. Placas
7. Molde
8. Sistema de Fechamento



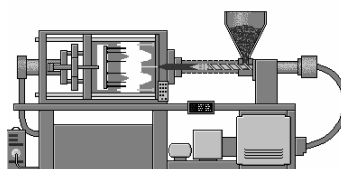
12

Princípio de Funcionamento

• Etapas básicas:

- 1) Plastificação do polímero;
- 2) Transporte do polímero plastificado para o molde
- 3) Injeção e preenchimento da cavidade do molde
- 4) Resfriamento da peça moldada
- 5) Remoção e ejeção da peça do molde

Clamping Injection Cooling Ejection



Fusão do Plástico

Injeção do fundido para dentro do molde

Resfriamento e solidificação da peça

Extração da peça do molde

13

Unidade de Injeção

O objetivo desta unidade é plastificar o polímero e injetá-lo na cavidade do molde.

Existem dois sistemas muito utilizados para plastificar e injetar o polímero:

- 1) **rosca recíproca:** que tem grande similaridade com a rosca de extrusão. Incorporam o princípio de plastificação por parafuso acoplado com a ação do parafuso como um pistão de injeção
- 2) **pistão:** muito utilizado antes das roscas recíprocas. São máquinas relativamente simples e limitadas na taxa de aquecimento

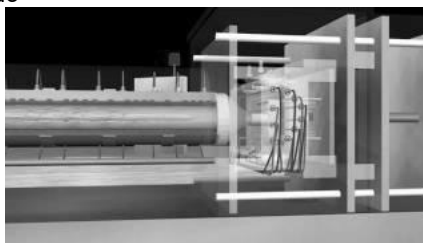
14

Unidade de Injeção – Rosca Recíproca

- Uma rosca recíproca gira transportando o material através de um barril aquecido, fundindo o material.

Esta rosca atua como um pistão injetando o material plastificado para dentro da cavidade

Na transferência do fundido para o molde, o material sai pelo bico da injetora, e escoam através da bucha do molde, dos canais de alimentação e de distribuição, até a entrada da cavidade do molde.



Uma quantidade de material é acrescentado para compensar o encolhimento do material (empacotamento)

15

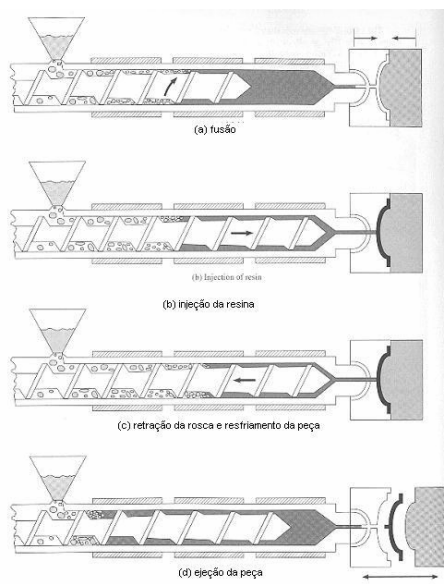
Roscas Recíprocas

- Plastificação

- Injeção

- Resfriamento

- Ejeção



16

Roscas Recíprocas

FIG. 1 TYPICAL SCREW IN AN INJECTION MOLDING MACHINE

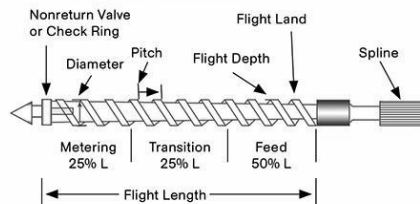


Illustration Courtesy of John Bozzelli



O tamanho das injetoras e das roscas recíprocas é bem menor que o das extrusoras, sendo valores típicos as razões de $L/D = 12 - 20$, o que sugere que sua capacidade de mistura é menos eficiente que as extrusoras.

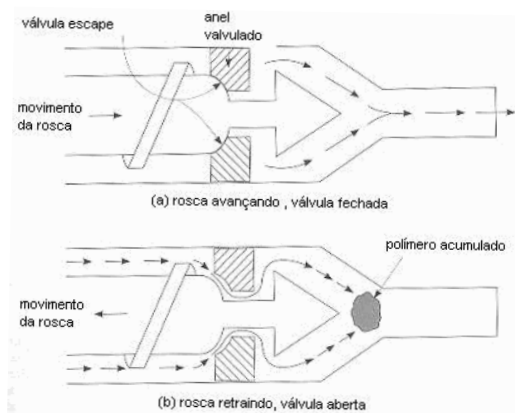
A razão de compressão nas roscas recíprocas é geralmente da ordem de 2 a 5, razões também bem menores que a das extrusoras.

Essa menor razão de compressão indica que é fornecida mais energia térmica, através dos aquecedores do barril, do que ação mecânica.

17

Roscas Recíprocas

Válvulas de Retenção

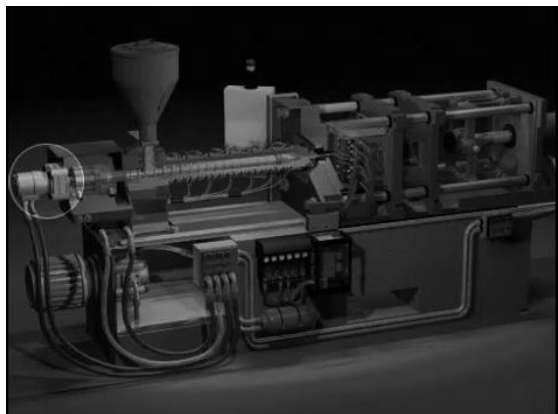


A principal função das válvulas de retenção é impedir que o polímero devidamente plastificado volte pelo canal da rosca durante injeção na cavidade do molde.

18

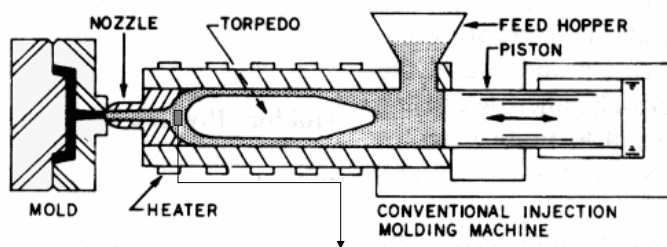
Roscas Recíprocas

Contra pressão: pressão exercida pela rosca durante o processamento, aumentando significativamente o cisalhamento da amostra e acelerando a fusão e homogeneização.



19

Unidade de Injeção – Tipo Pistão



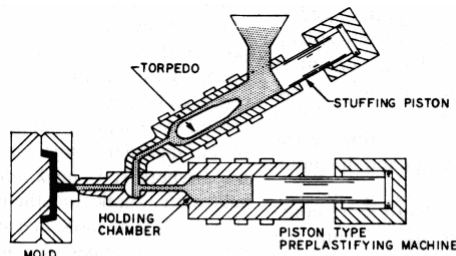
Placa de contra-pressão

Fusão se dá pelo fornecimento de energia térmica através de aquecedores.

Para facilitar a fusão e o grau de mistura, o fundido é forçado a passar por um torpedo que junto com uma placa de contra-pressão, impõe cisalhamento ao fundido.

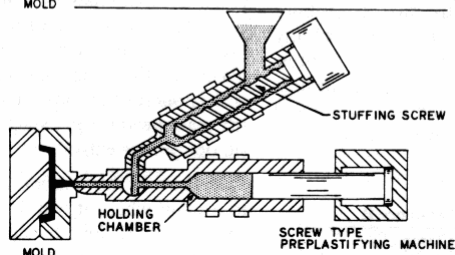
20

Unidade de Injeção – Dois estágios



2 Estágios

pré-plastificação
com pistão



2 Estágios

pré-plastificação
com rosca
recíproca

21

Unidade do Molde

Moldes: situam-se entre as placas estacionárias e móvel da máquina de moldagem por injeção. O molde apresenta duas seções principais: a placa fixa e a placa móvel. Portanto, a placa móvel do molde se movimenta com a placa móvel da máquina, permitindo que ele se abra e a peça seja ejetada.

São compostos de inúmeras partes com funções específicas.

- Entradas (Nozzles)
- Bucha de Injeção (Sprue)
- Canais (Runners)
- Pontos de Injeção (Gates)
- Cavidades (Cavity)
- Peças (Parts)

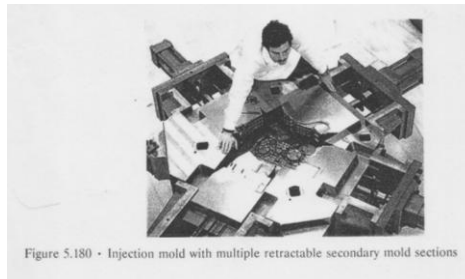


Figure 5.180 • Injection mold with multiple retractable secondary mold sections

22

Unidade do Molde

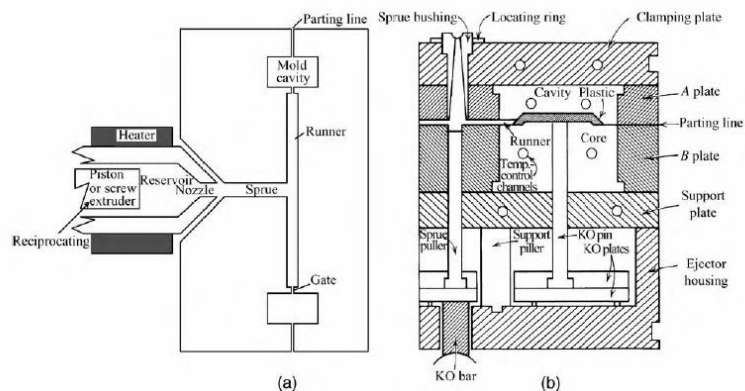
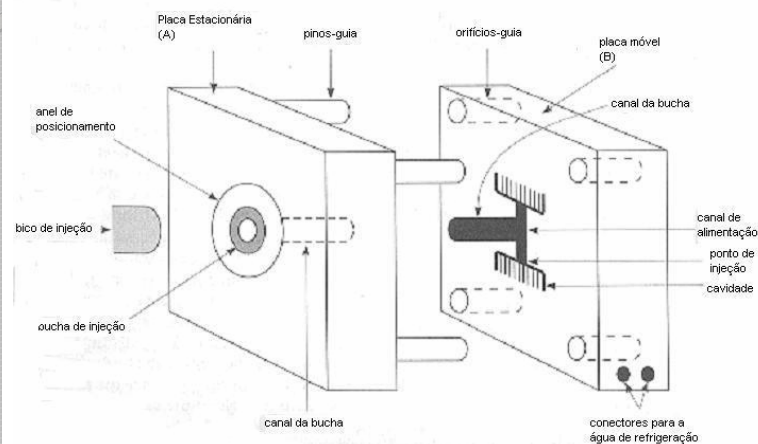


Fig. 13.3 (a) Schematic view of injection molding tooling showing the tip of the injection system and its connection to the mold. Melt passes from the reservoir through the nozzle, the sprue, and the runner system, entering the mold cavities through the gate. (b) Two-plate mold. [Courtesy of Robinson Plastic Corporation.]

23

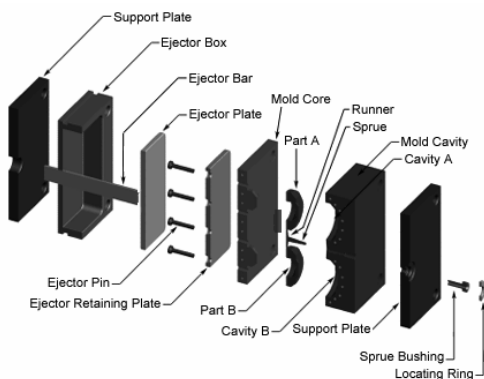
Unidade do Molde



24

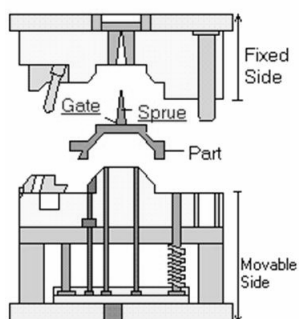
Unidade do Molde

Buchas de Injeção Fria: a bucha não deve apresentar muita resistência, ao escoamento do fundido; geralmente tem a forma de um canal cônico divergente curto.

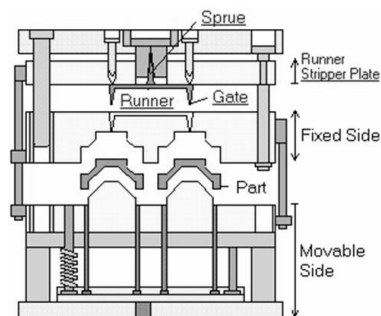


25

Unidade do Molde



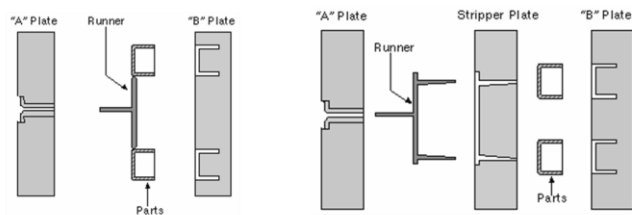
Molde de Duas Placas



Molde de Três Placas

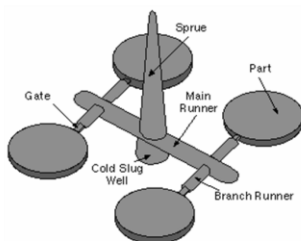
26

Unidade do Molde



A two-plate mould.

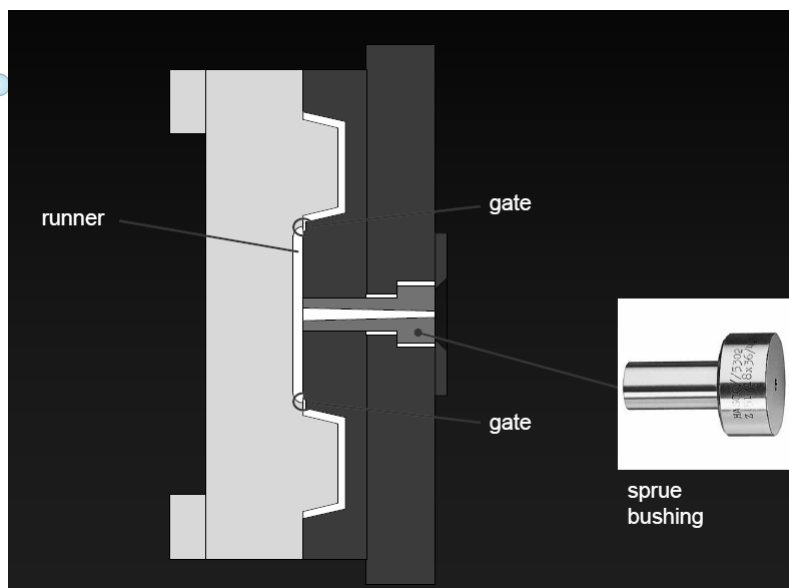
A three-plate mould.



The moulded system includes a delivery system and moulded parts.

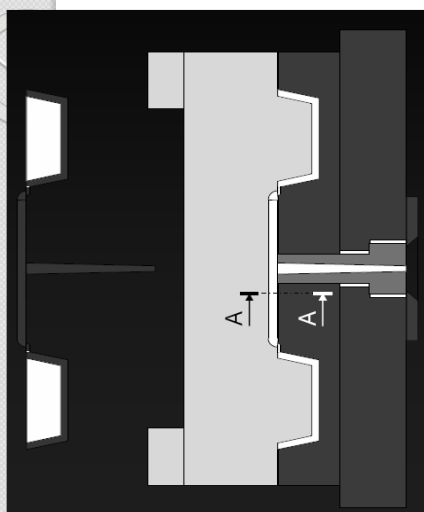
27

Unidade do Molde



28

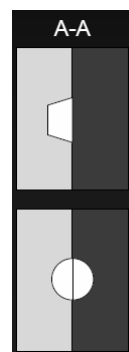
Unidade do Molde



Os corredores de distribuição podem ser usinados na placa móvel, ou alternativamente, em ambas as placas

☐ Corredores somente na placa móvel.

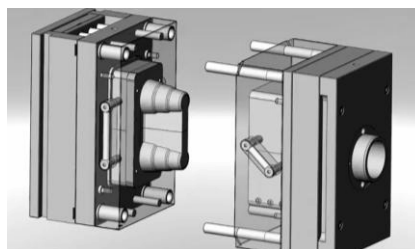
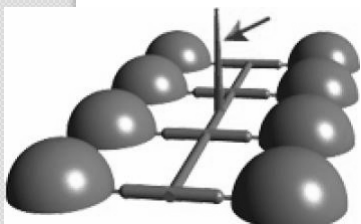
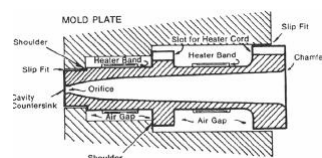
☐ Corredores em ambas as placas; melhor; mais caros.



29

Unidade de Molde

Canais Quentes



30

□ Moldes

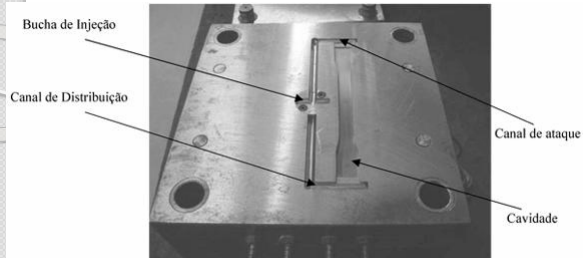


Figura 1: Fotografia da placa móvel do molde de injeção

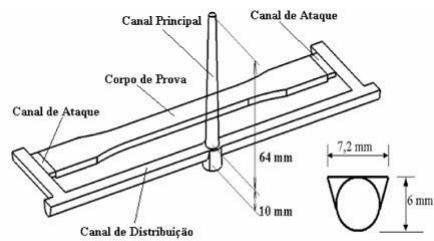
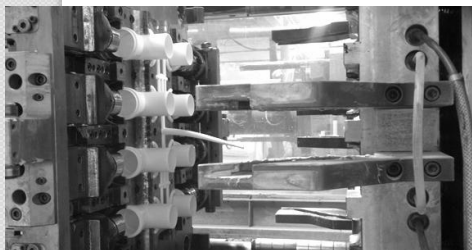
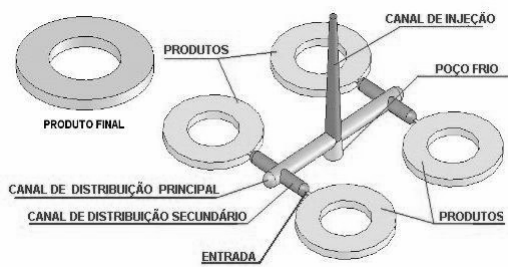


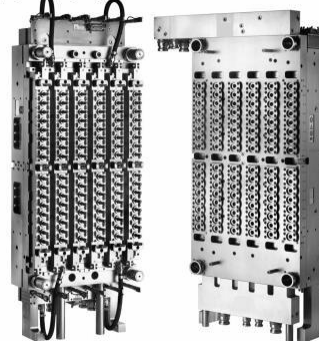
Figura 2: Forma das cavidades que formam o conjunto corpo de prova e canais de distribuição.

31

□ Moldes



<http://guozhixiel.gmc.globalmarket.com/>



Pré-forma – 90 cavidades

32



□ Moldes

Moldes com Câmara Quente.

33



Unidade de Fechamento

- Manter as superfícies do molde fechadas enquanto o polímero é injetado e a peça é resfriada. Fornece também a força de ejeção das peças.

$$F = P \times A$$

Força de fechamento = pressão de injeção x área total projetada das cavidades

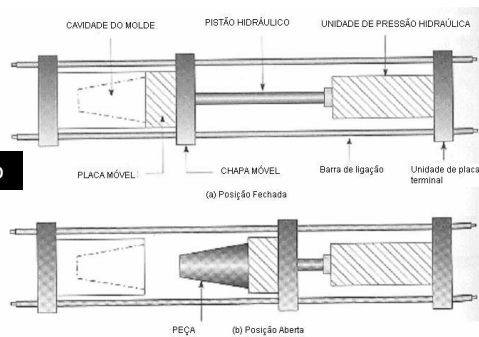
Há dois tipos de sistemas mais frequentes de fechamento:

1. Fechamento hidráulico
2. Fechamento Mecânico (alavancas articuladas)

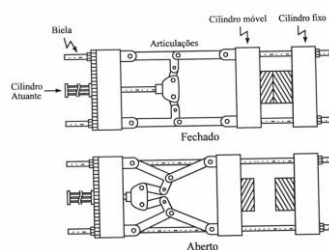
34

Unidade de Fechamento

Fechamento hidráulico

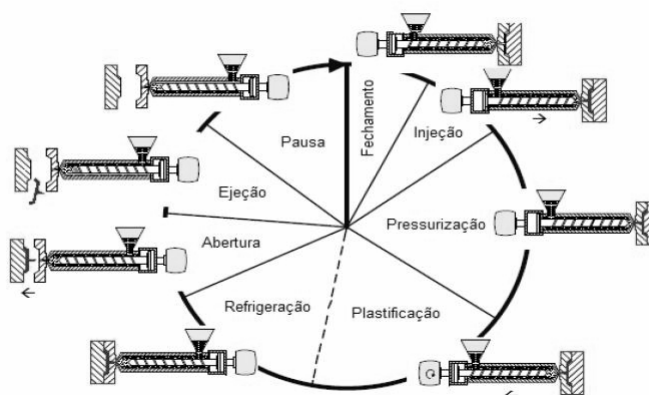


Fechamento Mecânico



35

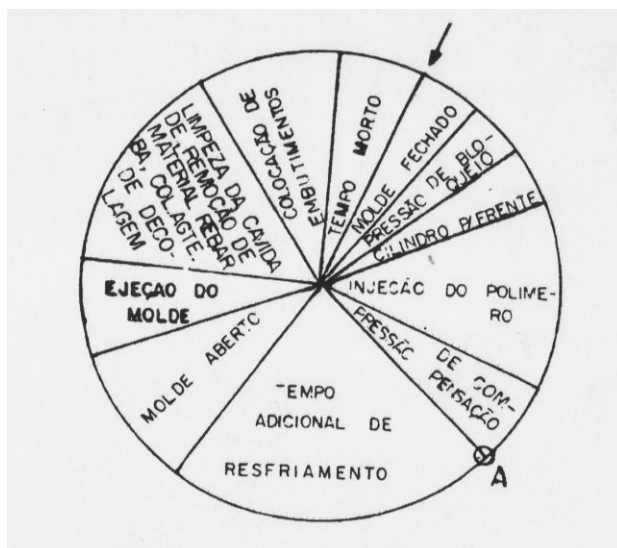
O Ciclo de Operação



Ciclo típico de injeção de termoplásticos.

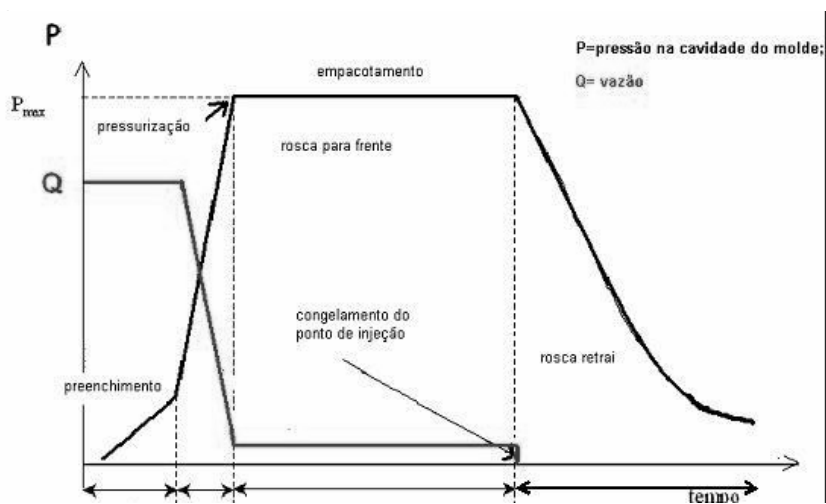
36

O Ciclo de Operação



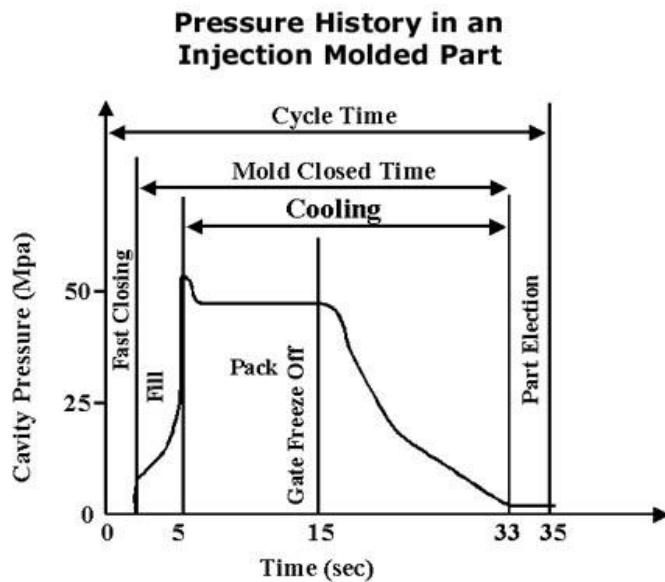
37

Variação de P e Q como uma função do tempo



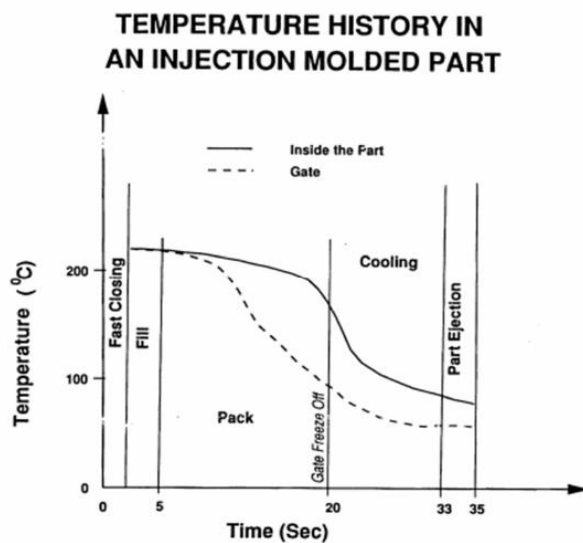
39

Variação de P como uma função do tempo



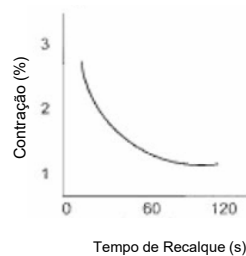
40

Variação de T como uma função do tempo

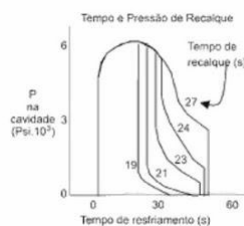


41

Efeito do tempo de compactação (ou de recalque) na contração de uma peça injetada.



Efeito do tempo de aplicação da pressão de recalque no tempo de resfriamento da peça



42

As etapas do processo de injeção

Preenchimento

Empacotamento

Resfriamento

43

Preenchimento

É a etapa entre o início do preenchimento e a transição para o empacotamento

Ao entrar na cavidade do molde, o fundido ainda está submetido ao fluxo e ao resfriamento, com a formação da camada congelada.

O tempo de preenchimento é uma medida da velocidade de injeção:

Em curtos tempos (velocidades de injeção altas), a pressão de preenchimento é alta e o fluxo é controlado por forças viscosas; pode haver aumento de temperatura do fundido devido ao aquecimento viscoso;

Em altos tempos (velocidade de injeção baixas), a pressão de preenchimento é baixa, a transferência térmica é predominante; o fundido esfria e aumenta sua viscosidade e consequentemente a pressão para encher o molde.

Em velocidades de injeção muito baixas, o fundido pode solidificar antes mesmo de preencher o molde: "short shot".

44

Preenchimento

Existe a queda de pressão dentro da cavidade

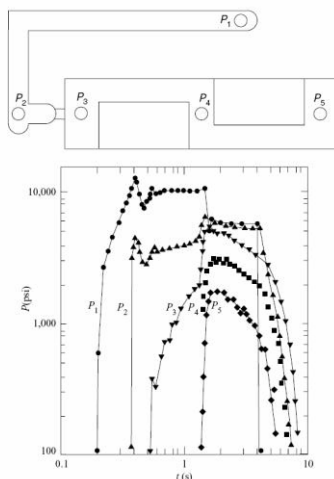


Fig. 13.5 Experimental pressure traces during mold filling of a rectangular cavity shown on the top with polystyrene at 400°F. P_1 is the pressure at the nozzle, P_2 the pressure at the end of the runner outside the gate, and P_3 – P_5 are cavity pressures at the locations indicated. Pressure traces P_4 and P_5 are questionable because of an unintentional preloading of the transducers upon mold closing. [Reprinted by permission from W. L. Kraeger and Z. Tadnor, "Injection Molding into Rectangular Cavity with Inserts," *Proc. Society of Plastics Engineering 36th Annu. Tech. Conf.*, Washington, DC, 1978, pp. 87-91.]

45

Preenchimento

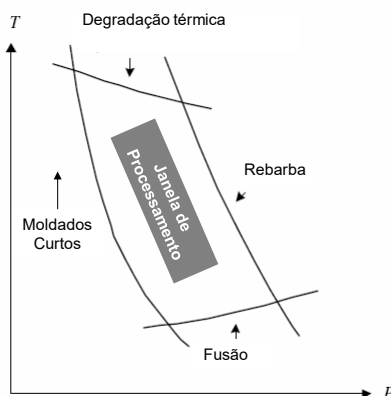


Fig. 13.6 Schematic “molding area” or “molding window” diagram that can be determined for a given polymer and mold cavity.

46

Empacotamento

O aquecimento do polímero fundido apresenta dois principais efeitos físicos:

- 1) **redução da viscosidade e aumento do volume devido a expansão térmica**
- 2) **a aplicação da pressão aumenta ligeiramente a viscosidade e reduz o volume do fundido por compressão.**



o aumento de volume do fundido devido ao acréscimo da temperatura é maior que a redução de volume devido ao acréscimo da pressão



menor quantidade de material é injetada no molde

47



Empacotamento

Durante o empacotamento, uma adição suplementar de polímero fundido à cavidade do molde para compensar a contração térmica durante sua solidificação.

Esta etapa influencia a distribuição de tensões de cisalhamento, principalmente próximo a interface sólido/fundido, devido a menor temperatura e consequentemente maior viscosidade do fundido.

Altas pressões de empacotamento podem aumentar a orientação molecular da peça injetada, além de deslocar a temperatura de cristalização 20-30°C para temperaturas mais altas.

48



Empacotamento

Durante a fase de preenchimento a máquina controla a vazão do polímero através da vazão de óleo; a velocidade no cilindro de injeção que controla o movimento da rosca.

Após o preenchimento do molde, a máquina passa a controlar a pressão de óleo para proporcionar o empacotamento.

49

Resfriamento

° Inicia-se imediatamente após a injeção do material e inclui tanto a fase de preenchimento quanto a fase de empacotamento, estendendo-se ainda mais no tempo.

A camada congelada age como isolante térmico devido a baixa condutividade térmica dos polímeros, permitindo um resfriamento lento no centro do moldado.

O processo de transferência de calor dentro do molde continua até que a peça tenha rigidez suficiente para ser ejetada.

Surgem tensões residuais, que são causadas pelas diferenças de perfis de temperatura (taxa de resfriamento) no moldado durante seu resfriamento.

50

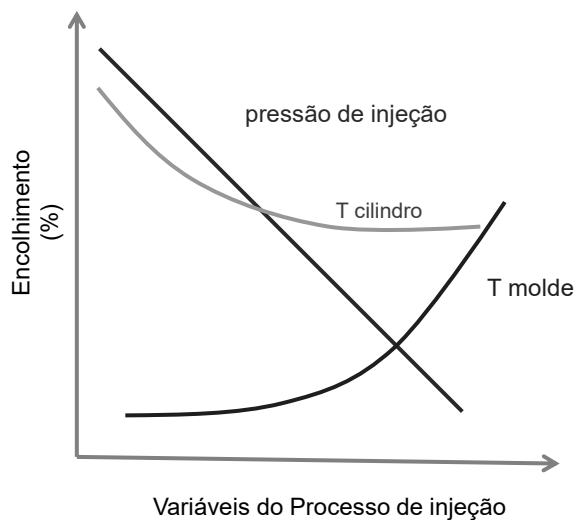
Efeitos da Temperatura do Cilindro e Temperatura do Molde no Encolhimento

° Aumentando a temperatura do cilindro, aumenta a pressão na cavidade do molde (a viscosidade mais baixa reduz as perdas de transmissão de pressão), mas este efeito pode ser anulado pelo vazamento do fundido devido a mesma queda de viscosidade.

Com o aumento da temperatura do molde, leva-se mais tempo para que ocorra o congelamento da entrada da cavidade do molde. Isto pode levar a um aumento na porcentagem de encolhimento.

51

Variáveis que afetam o encolhimento de peças injetadas



52

Taxa de Resfriamento

A taxa de resfriamento não determina somente a taxa de produção, mas controla três fatores que contribuem para a qualidade do moldado:

- Nível de acabamento superficial;
- O grau de relaxação da orientação e consequentemente o nível de tensões congeladas no moldado;
- O grau de cristalinidade

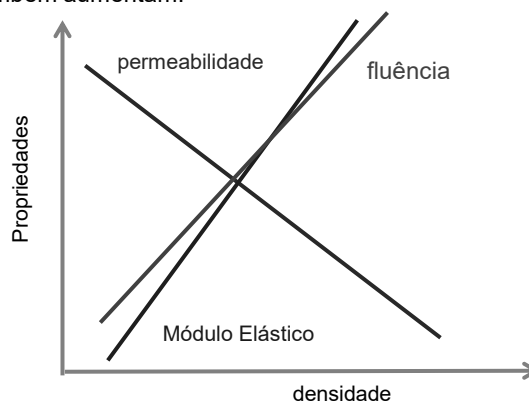
A taxa de resfriamento é controlada pela entalpia do polímero à temperatura de moldagem e sua efetiva taxa de transferência de calor, junto com a temperatura do molde e sua habilidade de transferir calor da face do molde até o sistema de refrigeração.

53

Efeito da taxa de resfriamento na cristalinidade

Baixas taxas de resfriamento (prolongados períodos de resfriamento) resulta em alta cristalinidade para moldados termoplásticos semicristalinos, sendo representado pelo aumento da densidade do material.

Com o aumento da cristalinidade, as propriedades dependentes da densidade também aumentam.



54

Efeito da taxa de resfriamento na cristalinidade

↑ espessura → menor taxa de resfriamento → ↑ cristal. → ↑ densid.

↑ T molde → menor taxa de resfriamento → ↑ cristal. → ↑ densid.

↑ T cilindro → menor taxa de resfriamento → ↑ cristal. → ↑ densid.

Efeito da taxa de resfriamento sobre o acabamento superficial

Resfriamento prolongado (altas temperaturas do molde) resulta em maior brilho superficial do moldado, pois permite maior período de relaxação da superfície do moldado, anulando os defeitos superficiais.

55

