



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

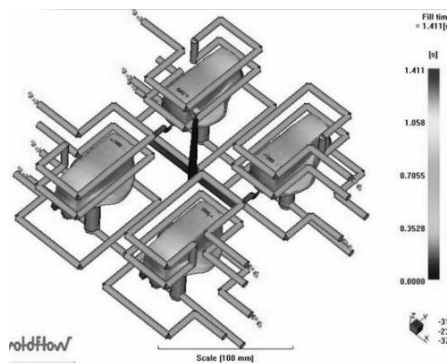
Março – Julho de 2025

1

Gradiente de densidade ao longo do moldado

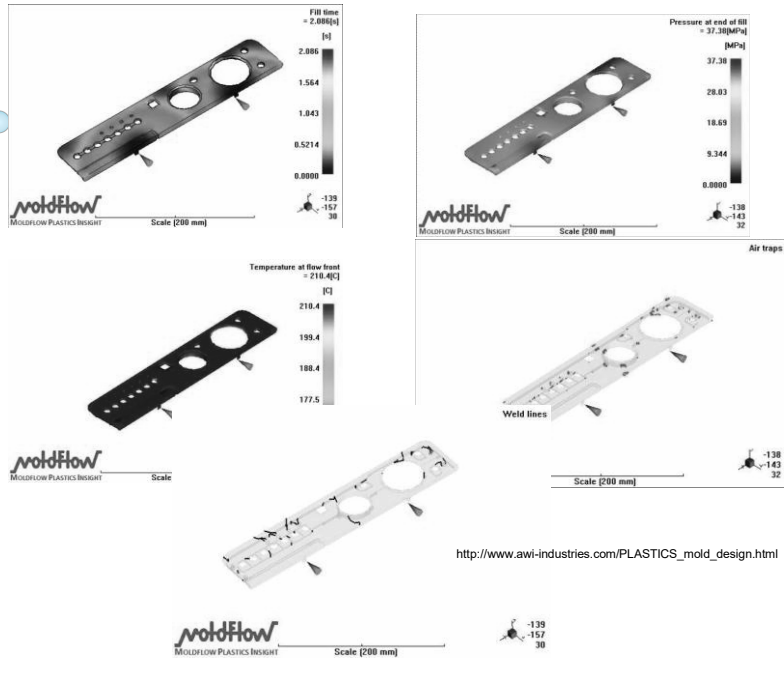
A densidade ao longo do moldado não é constante por vários motivos:

1. capacidade das diferentes regiões do molde para remover o calor da peça varia devido a diferença na espessura do metal do molde e a distância das paredes da cavidade do molde aos canais de refrigeração.



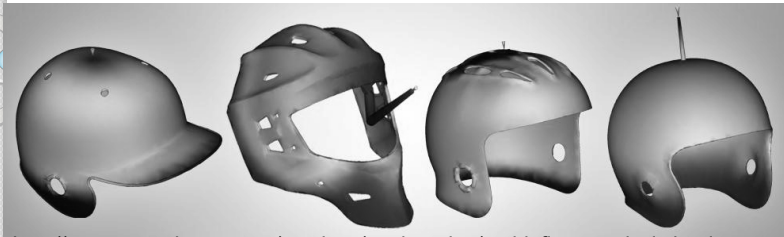
2

Simulação do Processo de Injeção

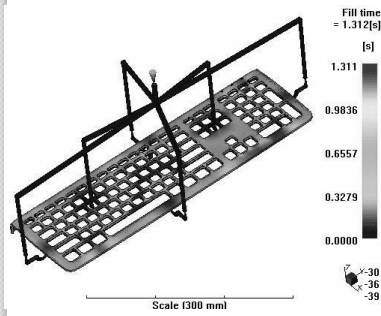


3

Simulação do Processo de Injeção



http://www.raytechcorp.com/services/engineering/mold_flow_analysis.html

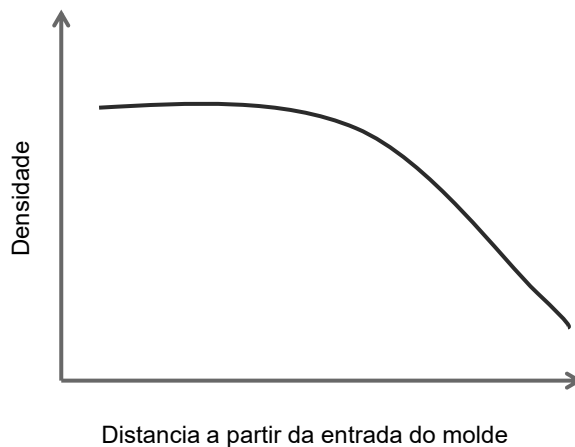


<http://www.importexportplatform.com/sellerdetails.asp?id=307929>

4

Gradiente de densidade ao longo do moldado

- 2. a região da entrada para a cavidade do molde é mais quente que as extremidades, visto que a primeira é aquecida pela passagem constante do material fundido para o interior da cavidade



5

Estruturação – A morfologia gerada durante a moldagem por injeção

Polímeros Semicristalinos

Polímeros de Cristalização Rápida: PE, POM, PP, etc.

Cadeias flexíveis

Polímeros de Cristalização Lenta: PET, PPS, PEEK, etc.

Cadeias rígidas (anéis aromáticos), a cristalização será função do estado de tensão do material e a morfologia final será função das condições de fluxo e de resfriamento.

6

Estruturação – A morfologia gerada durante a moldagem por injeção

• Polímeros de Cristalização Rápida: PE, POM, PP, etc.

Quando moldados por injeção, em geral apresentam uma estrutura de três camadas quando observados em um microscópio ótico:

1. uma superfície altamente orientada, como consequência das altas taxas de cisalhamento experimentadas pelo polímero próximo à parede do molde. A esta camada são atribuídos empilhamentos de lamelas com os eixos das cadeias nucleados na direção do fluxo e com crescimento na direção perpendicular ao fluxo;
2. uma camada transcristalina, de esferulitos muito pequenos e assimétricos formados sob altos gradientes de temperatura;
3. núcleo esferulítico tridimensional, aleatoriamente orientado, como resultado da cristalização quiescente (na ausência de tensões).

7

Estruturação – A morfologia gerada durante a moldagem por injeção

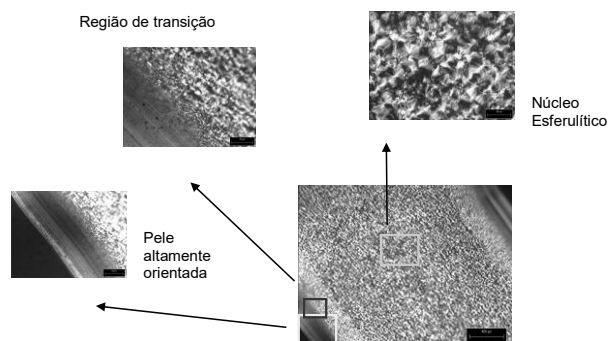


Figura 3.5 – Microestrutura típica de três camadas em hPP moldado por injeção (Temperatura de injeção, $T_i=250^\circ\text{C}$, Temperatura do Molde, $T_w = 90^\circ\text{C}$, Vazão, $Q = 5\text{cm}^3/\text{s}$, Pressão de empacotamento, $P_h = 550\text{ bar}$ e tempo de empacotamento, $t_h = 5\text{min}$).

8

Orientação

□ Em polímeros 100% amorfos

Os vários graus de orientação produzem uma variação no índice de refração pela peça.

Sob luz polarizada uma série de linhas coloridas chamadas de *isocromáticas*. **Isocromáticas são linhas com a mesma orientação molecular.**

9

Orientação

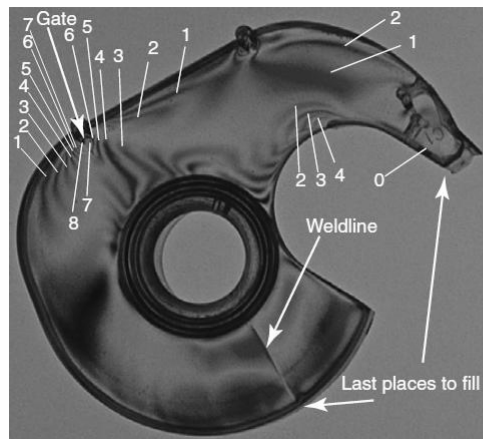


Figure 7.1 Isochromatics in a polystyrene part of 1.7 mm wall thickness

10

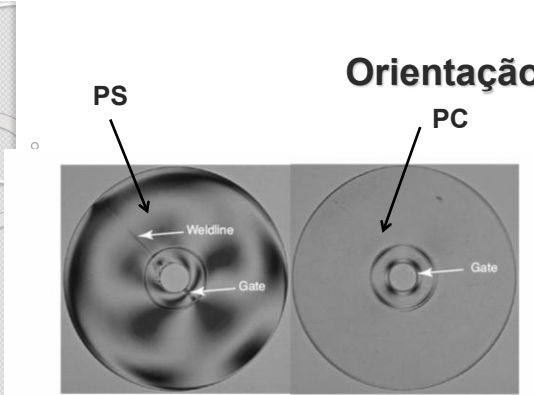


Figure 7.3 Isochromatics in polycarbonate and polystyrene discs

☐ Tipos de Entradas

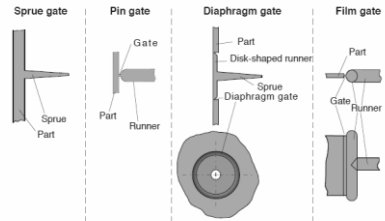


Figure 6.67 Schematic of different gating systems

11

Orientação

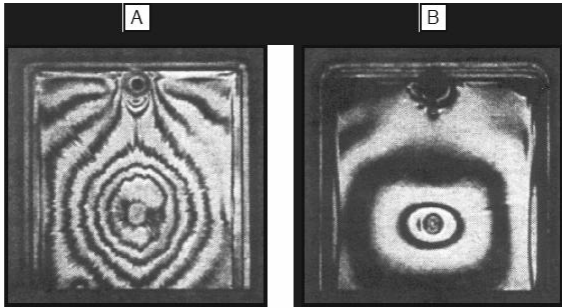


Figure 7.4 Isochromatics in polycarbonate parts molded with (left) piston-type and (right) screw-type injection molding machines

12



Orientação

O objetivo de preencher uma cavidade de molde é obter um preenchimento completo, sem marcas de fluxo, empenamento, rebarbas, marcas de queima e, é claro, uma peça com boas propriedades mecânicas.

Isto pode ser obtido através do fornecimento da quantidade correta de material, da ausência de pressurização excessiva ("overpressure"), elevadas tensões térmicas e elevada tensão residual.

O material flui através da camada devido ao gradiente de pressão aplicado. Assim que o material atinge regiões mais distantes da cavidade (relativas ao ponto de injeção), o **gradiente de pressão é reduzido devido ao aumento do comprimento de fluxo e resfriamento do fundido, tornando-o mais viscoso.**

Comprimento do fundido = f (espessura da peça, gradiente de pressão e viscosidade do material).

13



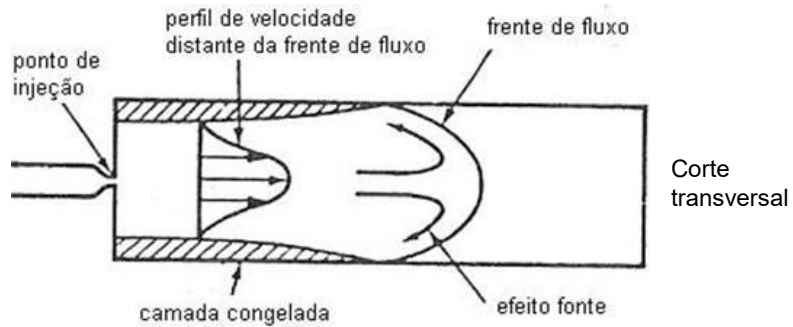
Orientação

As condições de processamento devem ser avaliadas cuidadosamente para um determinado conjunto molde-polímero, já que podem promover pressurização excessiva e tensões residuais no moldado

14

Orientação

Evolução da frente de fluxo dentro de uma cavidade do molde.

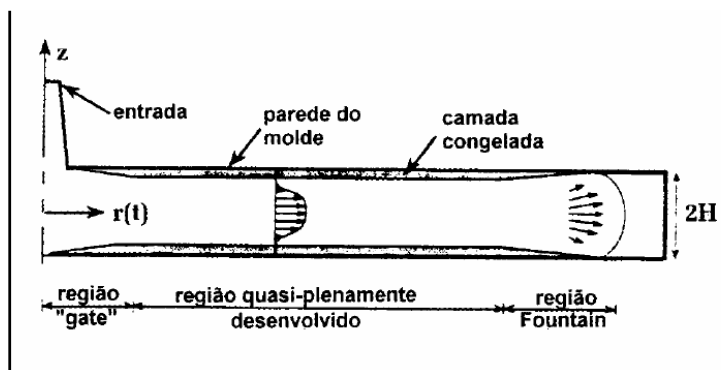


O material flui através da cavidade devido ao gradiente de pressão aplicado

15

Orientação

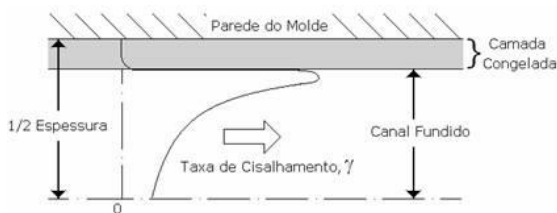
Evolução da frente de fluxo dentro de uma cavidade do molde.



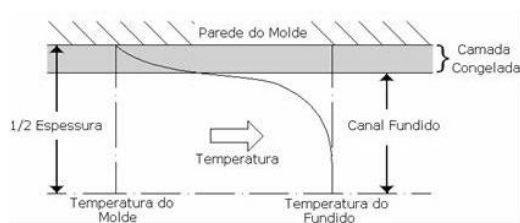
16

Orientação

Evolução da frente de fluxo dentro de uma cavidade do molde.



A taxa de cisalhamento é máxima próxima à camada congelada.



A temperatura varia mais próximo a parede; O interior se resfria mais lentamente devido ao efeito congelante da camada.

17

Orientação

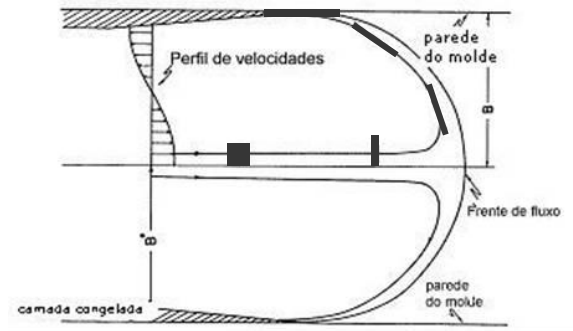
Evolução da frente de fluxo dentro de uma cavidade do molde.

Modelo de Tadmor: a origem da alta orientação junto à parede do molde, ou seja, na superfície da peça moldada é o escoamento tipo fonte ("fountain flow"), que ocorre na frente de fluxo e que faz com que partículas fluidas sejam transportadas da região central para as proximidades da parede do molde.

As partículas fluidas no centro desaceleram-se na direção axial conforme atingem a interface polímero-ar e adquirem uma componente radial de velocidade (aceleração na direção perpendicular ao fluxo) movendo-se para a região da parede do molde. Nesta região ocorre um fluxo essencialmente elongacional estacionário.

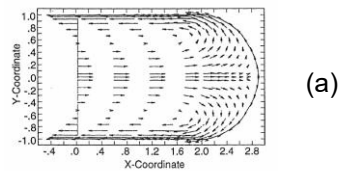
18

Fountain flow – efeito fonte (Tadmor, 1974)

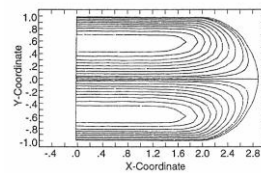


As partículas de fundido situadas a uma certa distância da frente de fluxo acabam chegando à camada congelada antes, gerando um fluxo perpendicular à parede do molde, **chamado fluxo tipo fonte**.

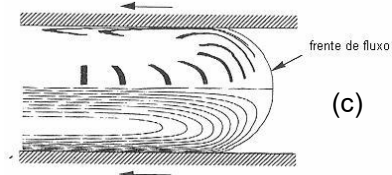
19



(a)



(b)



(c)

Efeito fonte: (a) vetor-velocidade relativo à frente de fluxo (b) linhas de fluxo durante o preenchimento isotérmico de uma cavidade com fluido Newtoniano (c) deformação de um elemento de fluido devido ao efeito fonte .

20

Orientação

Evolução da frente de fluxo dentro de uma cavidade do molde.

A espessura da camada congelada pode ser controlada com os parâmetros ligados à velocidade e temperatura:

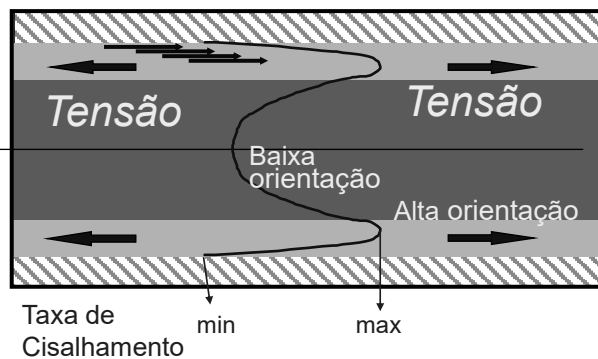
- Velocidade de injeção ou vazão;
- Temperatura do molde
- Temperatura do fundido

21

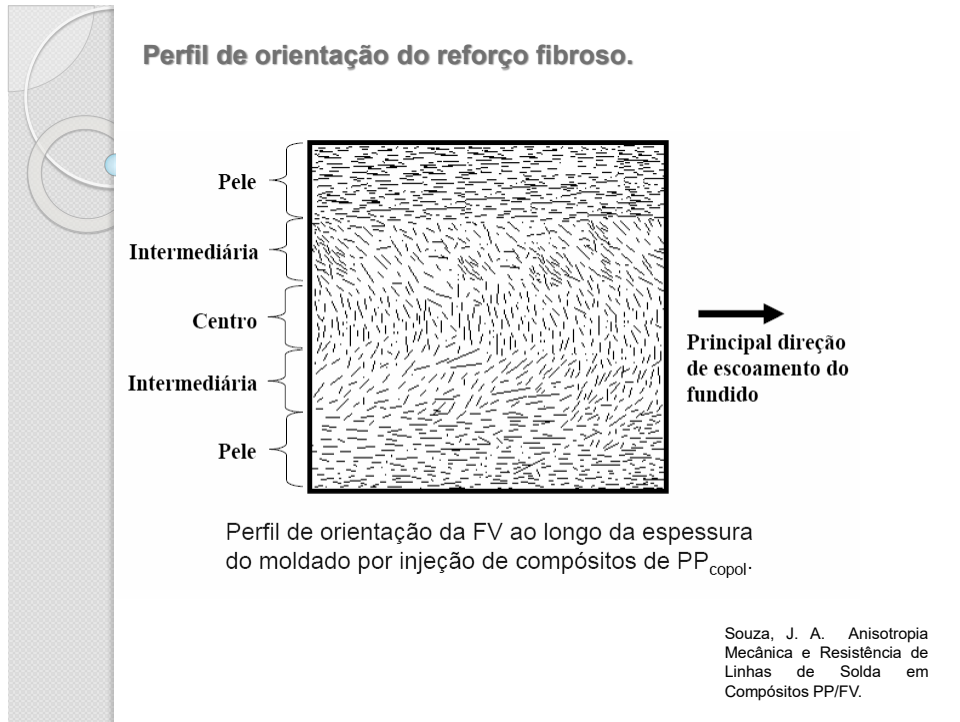
a altas velocidades de injeção, a máxima orientação relativa é mais pronunciada e se localiza mais próxima à parede do molde.

- ° O grau de orientação das moléculas e a espessura da camada congelada influenciam as propriedades mecânicas do moldado, sendo estas maiores na direção da orientação.

Orientação Molecular é causada pelo cisalhamento. O maior cisalhamento está na camada congelada, portanto a maior orientação



22



23



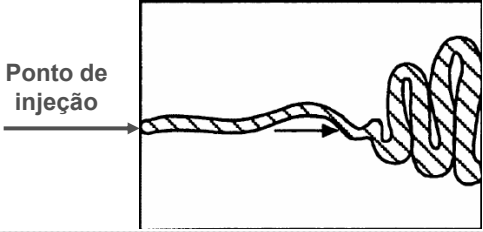
24

Orientação

O polímero fundido flui dentro da cavidade em ondas, descrito pelo efeito fonte

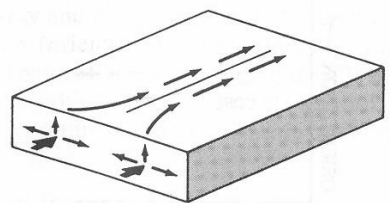
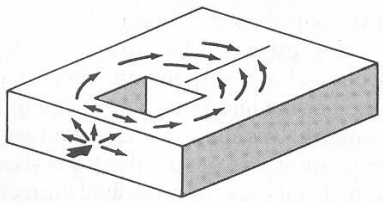


Se a velocidade de injeção for muito alta, não se verifica o efeito fonte e o polímero flui diretamente até o final da cavidade – é o jato direto ("jetting")



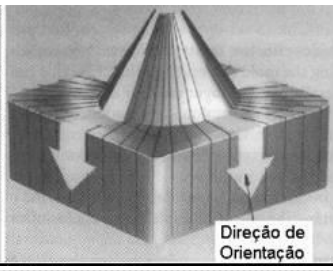
25

O caminho do fluxo dentro da cavidade do molde é determinado pelo formato da peça e pela posição do ponto de injeção



Frentes de fluxo que se encontram frontalmente irão se unir, formando as chamadas "linhas de solda",

Frentes de fluxo paralelas tendem a se misturar, geralmente resultando em uma linha de solda menos visível e mais resistente



26

Diferença entre linhas de solda e linhas de emenda

Linhas de Solda

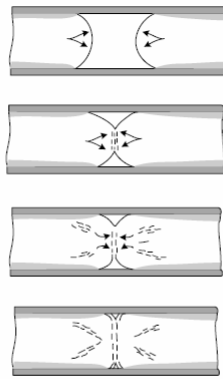
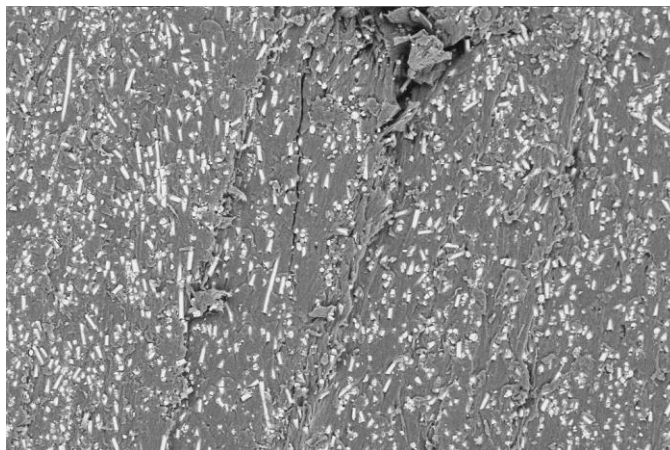


Fig. 13.20 Schematic representation of the impingement and the subsequent flows in the weld-line region: gray areas indicate cold regions of the melt; dashed lines denote regions undergoing extensional flow. [Reprinted by permission from S. Y. Hobbs, "Some Observations on the Morphology and Fracture Characteristics of Knit Lines," *Polym. Eng. Sci.*, **14**, 621 (1974).]

27

Diferença entre linhas de solda e linhas de emenda

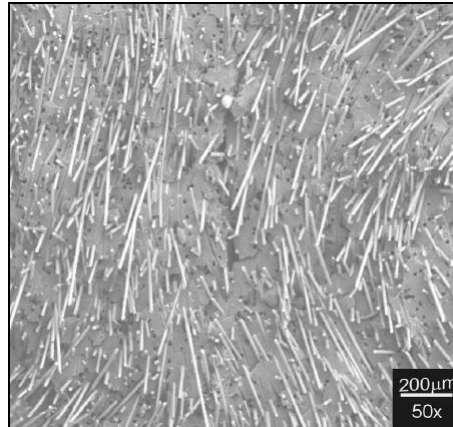
Linhas de Solda



28

Diferença entre linhas de solda e linhas de emenda

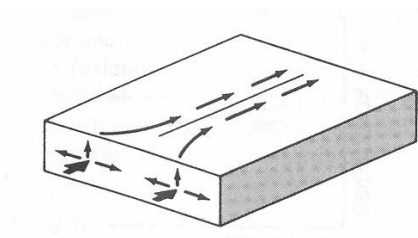
Linhas de Solda



29

Diferença entre linhas de solda e linhas de emenda

Linhas de Emenda



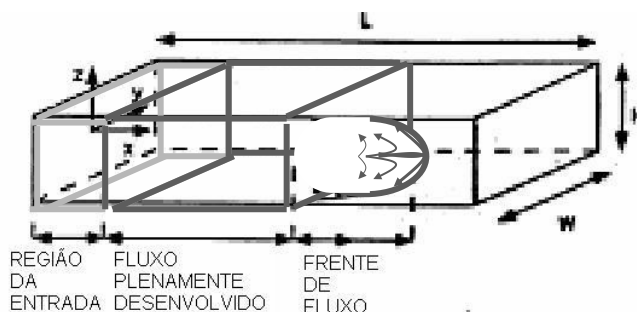
- não são resultados de encontros frontais de linhas de fluxo, mas pelo encontro de linhas de frente não frontal. **Nesse caso, o fluxo dessas frentes possui o mesmo sentido e direção.**

30

Orientação

Três regiões com diferentes regimes de escoamento podem ser identificadas, na etapa de enchimento da cavidade do molde:

- região de entrada;
- região de escoamento plenamente desenvolvido
- região da frente de fluxo.



31

Orientação

O grau de orientação depende:

- das condições de processamento,
- do tipo de máquina (pistão ou rosca),
- do tipo de material
- da espessura do molde.

Em geral, o grau de orientação aumenta com a redução da espessura da cavidade, devido ao maior gradiente de velocidade presente em pequenas espessuras.

A anisotropia em peças moldadas por injeção é verificada tanto na direção do fluxo quanto na direção transversal ao fluxo. O grau de anisotropia ao longo da espessura da peça depende da posição onde a amostra foi retirada (em relação ao ponto de injeção)

32

Injeção Multicomponentes

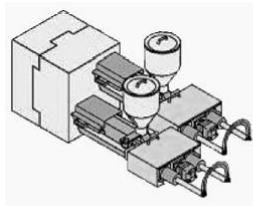
- A **injeção multicomponente ou multicolor** é usada para injetar dois ou mais componentes por diferentes sistemas de canais ou entradas em diferentes estágios durante o processo de moldagem. Cada componente é injetado usando sua **própria unidade de plastificação**.

Normalmente o molde está sobre uma **mesa que gira**. Muito utilizado quando **dois materiais incompatíveis são moldados** ou quando **não apresentam adesão**.

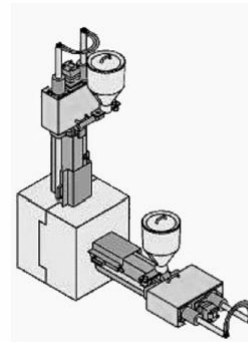


37

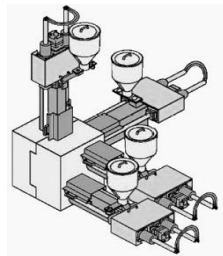
Injeção Multicomponentes



Equipamento com duas unidades de injeção frontais



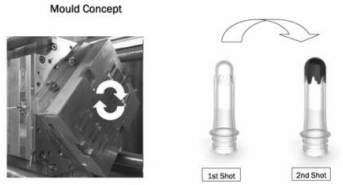
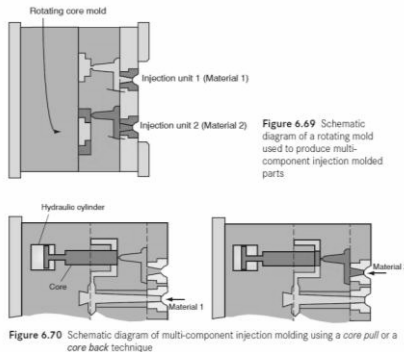
Equipamento com duas unidades de injeção, sendo uma frontal e uma lateral



Equipamento com quatro unidades de injeção

38

Injeção Multicomponentes



39

Co-injeção

Em contraste com a injeção multicomponentes, a co-injeção usa os mesmos canais e entradas. Aqui o componente que formará a pele externa é injetado primeiro, seguido pelo componente do centro (corpo).

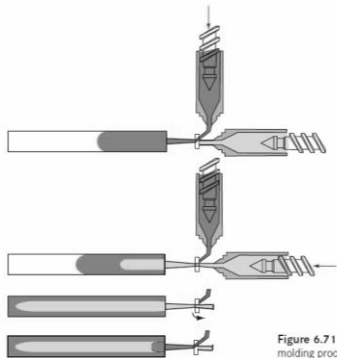
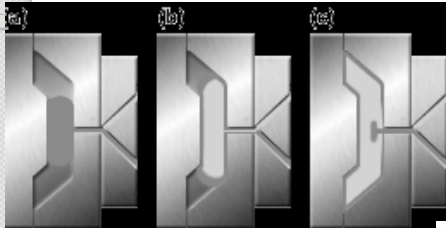


Figure 6.71 Sequential co-injection molding process

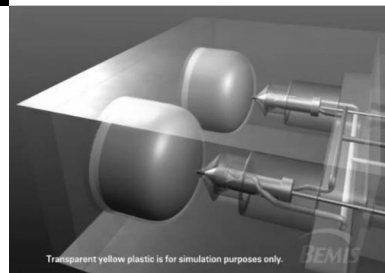
40

Co-Injeção

- Processo sequencial no qual dois materiais, pele e interior, são injetados em um molde através de bicos especiais



O primeiro material forma uma pele contínua, enquanto que o segundo, polímero forma o núcleo da peça.



41

Injeção Assistida por Gás (GAIM)

- Na injeção assistida por gás (GAIM) o processo começa com o preenchimento parcial ou perto do preenchimento completo do molde, seguida pela injeção de um gás inerte (tipicamente nitrogênio) dentro do corpo do polímero fundido.

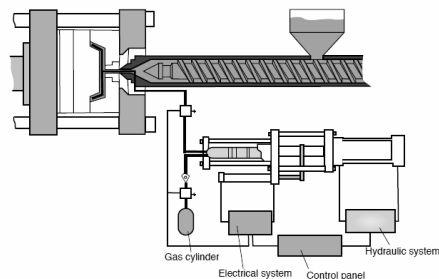


Figure 6.74 Schematic diagram of a typical injection molding machine adapted for gas-assisted injection molding with an add-on gas-compression cylinder and accessory equipment [3]

42

Injeção Assistida por Gás (GAIM)

- A injeção assistida por gás é um processo especial de um tópico muito maior chamado, moldagem por injeção assistida por fluídos, que engloba também a injeção assistida por água.

Exemplos de métodos

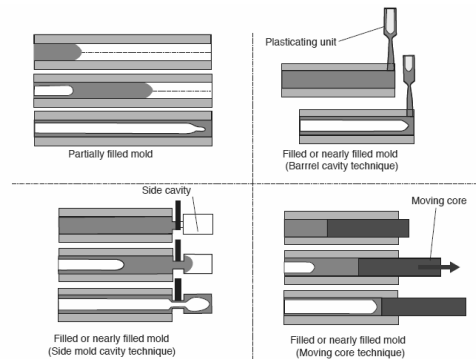


Figure 6.72 Schematic classification of fluid-assisted injection molding processes

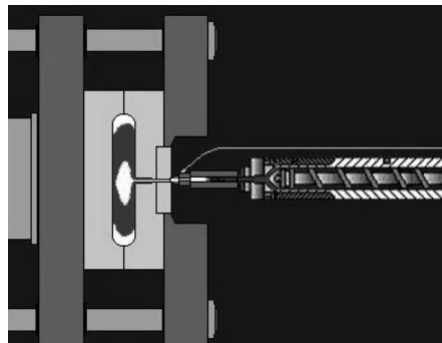
43

Injeção Assistida por Gás



O molde é parcialmente preenchido com o polímero plastificado.

Com a ajuda de um gás, a massa do fundido é pressionada contra as paredes do molde.



44

Moldagem por Injeção-Compressão

- A injeção-compressão é uma extensão da moldagem por injeção convencional, incorporando a compressão do polímero visando produzir peças com estabilidade dimensional e precisão superficial.

A cavidade do molde tem uma maior seção transversal que permite o polímero fluir facilmente até suas extremidades sob baixa pressão. Durante ou após preenchimento a espessura da cavidade do molde é reduzida, forçando o fundido preencher a cavidade.

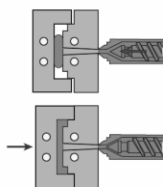


Figure 6.75 Schematic of the injection-compression molding process [3]

45

Moldagem por Injeção-Compressão (ICM)

- A ação de compressão resulta em maior uniformidade de distribuição de pressão ao longo da cavidade do molde, permitindo propriedades físicas mais homogêneas, menores encolhimento, empenamento e tensão residual que o processo convencional.

A estagnação do fluxo no interior da cavidade pode produzir pequenas marcas, sendo altamente indesejáveis.

Para evitar esse defeito superficial e facilitar o fluxo contínuo do polímero, pode se realizar a ICM simultânea, **onde a compressão é ativada enquanto a resina está sendo injetada.**

46

Moldagem por Injeção-Compressão (ICM)

A vantagem primária da ICM é a habilidade de produzir peças dimensionalmente estáveis, livre de tensão residual, a baixas pressões (tipicamente de 20 a 50% menores que a moldagem por injeção convencional) e tempo de ciclo reduzido.

▪ Aplicações que exigem paredes finas, com grande materiais com dificuldade de fluxo, como é o caso do PC, podem ser moldadas com espessura de 0,5 mm.

É uma tecnologia muito adequada para a produção de CD/DVD e outras lentes com alta qualidade e baixo custo.

47

Injeção Reativa (RIM)

A RIM envolve a mistura de dois líquidos reativos em uma cabeça de mistura antes de ser injetada à alta velocidade na cavidade do molde.

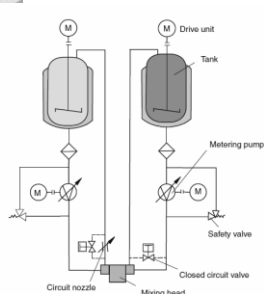


Figure 6.76 Schematic diagram of a high pressure polyurethane injection system

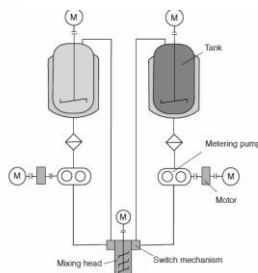


Figure 6.77 Schematic diagram of a low pressure polyurethane injection system

Os líquidos reagem no molde para formar ligações cruzadas. A mistura dos dois líquidos ocorre na cabeça de injeção, a alta velocidade.

48

Injeção Reativa (RIM)

Normalmente apresenta **ciclos curtos, baixas pressões de injeção e força de fechamento, associado à produção de peças com alta resistência mecânica, ao calor e química.**



ideal para a produção rápida de grandes peças para-choques e painéis de automóveis.

A RIM é um processo para a rápida produção de peças complexas **a partir de monômeros ou oligômeros**. O molde e os parâmetros de processo são geralmente mais complexos devido ao **controle de reação química durante o processamento**.

49

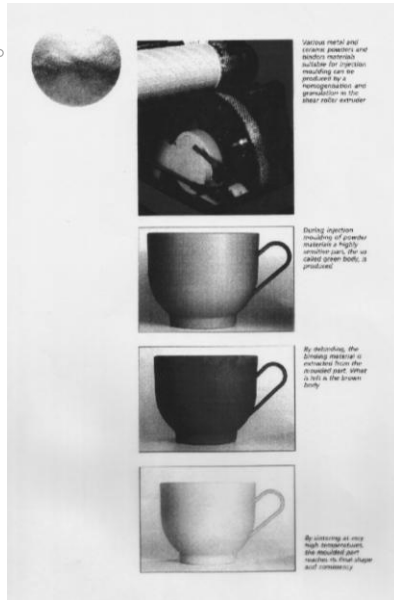
Injeção Reativa (RIM)

Entretanto, um preenchimento lento pode causar **a formação de “gel”** que resulta em moldados curtos. Preenchimentos rápidos podem induzir a formação de fluxo turbulento, criando porosidade interna.

A baixa viscosidade pode causar ainda rebarbas nas peças, requerendo etapa de retirada de material em excesso. Como a RIM é vastamente utilizada para PU, onde o isocianato requer cuidados devido sua periculosidade.

50

Injeção de outros materiais (cerâmicas)



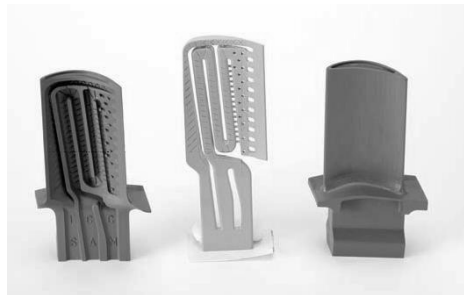
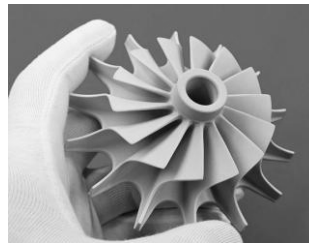
A injeção também pode ser utilizada na fabricação de alguns materiais cerâmicos. Neste caso é necessário incorporar o polímero, pois este atuará como um auxiliar de fluxo (40 a 50% em massa). Durante a queima e sinterização o polímero sofrerá degradação.

51

Injeção de outros materiais (cerâmicas)



A injeção é um processo bastante versátil.



52

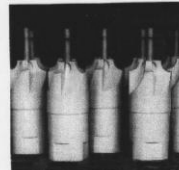
Injeção de outros materiais (cerâmicas)



which leads to considerable time and cost advantages.

Versatile application possibilities

One application possibility is for example the production of hard metal cutters. The fully automated production of the cutter and the simultaneous shaping of an internal thread to be screwed onto a shaft, as well as very short sprues ensure material and time savings.

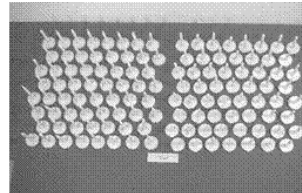


A further application field of powder injection moulding is the production of porcelain cups. The conventional production of a cup includes several steps. First the cup itself must be formed, then the handle must be shaped. Finally the handle is attached to the cup and the complete cup is fired.

By processing porcelain on injection moulding machines, it is possible to produce cup and handle in one step. A separate attachment of the handle is no longer necessary. The connection between handle and cup is much more fracture proof than with conventional manufacturing methods.



A injeção é um processo bastante versátil.



Injection moulded zirconia gears made from 70nm diameter particles.

https://www.ucl.ac.uk/chemistry/staff/academic_pages/julian_evans/research