

PROGRAMAÇÃO E AJUSTES DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE DA MÁQUINA INJETORA

1 – Programação das Temperaturas

1.1 – Definição de temperatura do fundido

É a temperatura que o material sai do bico da máquina injetora e entra no canal da bucha do molde de injeção, sendo indicado na figura 1 por T_m .

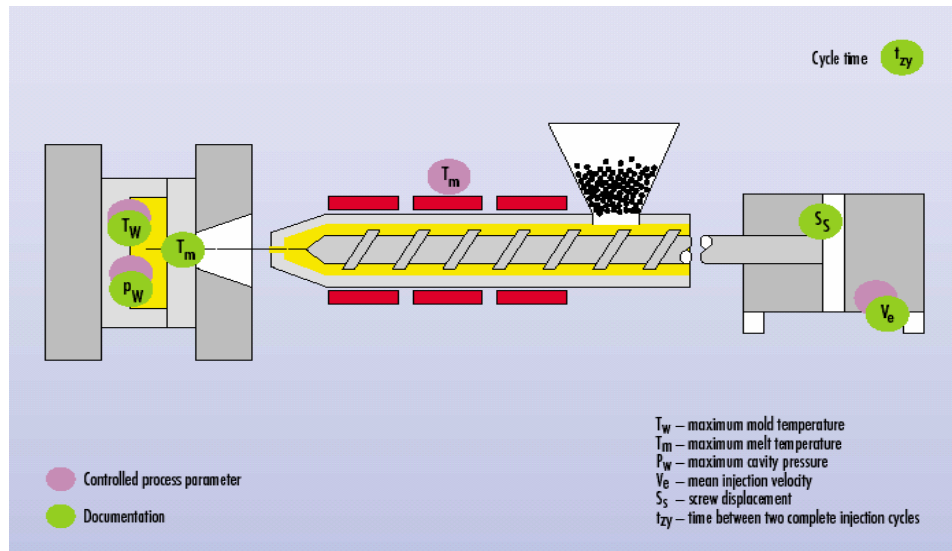


Figura 1 – Indicação dos locais para a medição de alguns parâmetros do processo (fonte www.plastics.bayer.de).

1.2 – Como programar as temperaturas do canhão

- Uso de tabelas de referência:
 - Fornecedores de matéria-prima
 - Fabricantes de máquinas para a transformação de termoplásticos
 - Handbooks e literatura especializada

Thermoplastic	Mold temperature in °C	Melt temperature in °C
● Apec®	100 to 150	310 to 340
● Bayblend®	70 to 100	240 to 280
● Desmopan®	20 to 40	190 to 240
● Durethan® A Durethan AKV Durethan B Durethan BKV	80 to 100 80 to 120 80 to 100 80 to 120	275 to 295 280 to 300 260 to 280 270 to 290
● Novodur®/Lustran®	60 to 80	220 to 260
● Lustran SAN	60 to 80	220 to 260
● Makrolon® Makrolon GF	80 to 100 80 to 130	280 to 320 310 to 330
● Pocan® Pocan GF	80 to 100 80 to 100	250 to 270 250 to 270
● Triax®	60 to 90	250 to 280

Table 1: Recommended mold and melt temperatures for the individual Bayer thermoplastics

Tabela 1 – Recomendações para as temperaturas do polímero e do molde a serem utilizadas no processo (fonte www.plastics.bayer.de).

MATERIAL	SÍMBOLO	BICO	ZONA2	ZONA3	ZONA4	ZONA5	MOLDE
Poliétileno de alta densidade	PEAD	210-240	220-250	210-240	190-220	190-220	30-50
Polipropileno	PP	240-270	240-270	230-260	220-250	220-250	30-50
Poliestireno	PS	220-280	210-280	180-230	150-180	150-180	30-50
Acrilonitrilo Butadieno Estireno	ABS	210-240	210-240	200-300	190-220	190-220	60-80
Estireno acrilonitrilo	SAN	200-230	190-220	190-220	180-210	180-210	50-70
Policloreto de vinila flexível	PVC	150-180	150-180	140-170	130-160	130-160	20-40
Policloreto de vinila rígido	PVC	170-200	170-200	160-190	150-180	150-180	40-60
Polimetacrilato de metila	PMMA	200-220	190-210	180-200	170-190	170-190	50-80
Polioximetileno Homopolímero	POM	190-210	180-200	170-190	170-190	170-190	60-90
Polioximetileno Copolímero	POM	180-200	170-190	170-190	160-180	160-180	60-90
Policarbonato	PC	290-310	300-320	290-310	280-300	280-300	80-120
Poliamida 6	PA6	230-250	230-250	220-240	210-230	210-230	60-80
Poliamida 6.6	PA6.6	260-280	260-280	250-270	240-260	240-260	60-100
Polibutireno Teraftalato	PBTP	240-260	230-250	230-250	210-230	210-230	60-80
Acetato de celulose	CA	190-220	210-230	200-220	190-210	190-210	40-60
Polioxifenileno	PPO	270-290	280-300	270-290	250-270	250-270	80-100

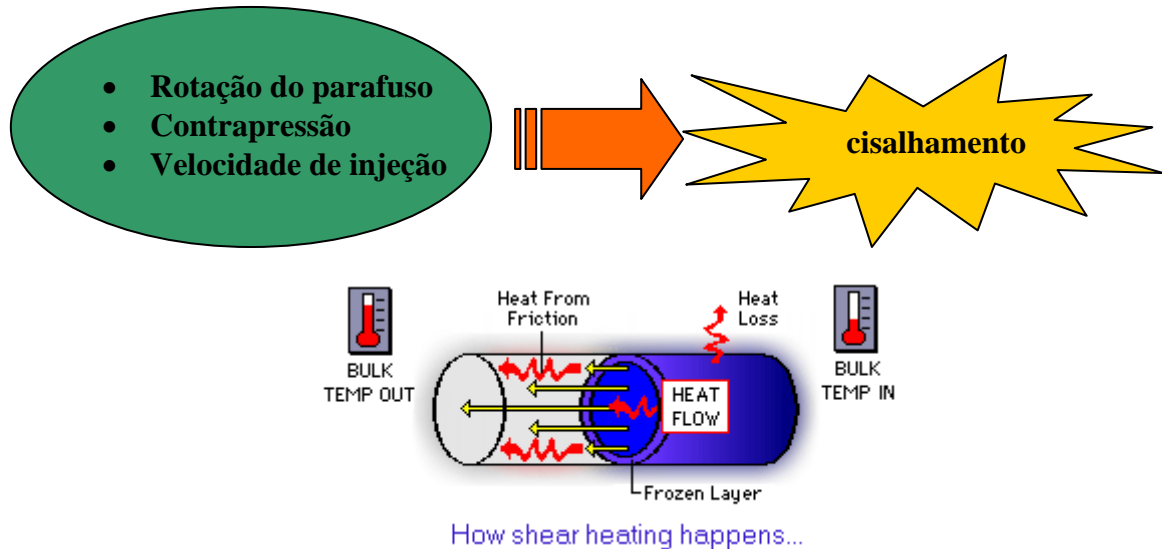
Tabela 2 - Recomendações para as faixas de temperaturas para cada zona do canhão de uma injetora (fonte manual das injetoras Romi série Primax).

- Programada normalmente de forma decrescente da zona do bico para a garganta de alimentação:
 - Aquecer gradualmente o polímero
 - Não produzir a plastificação do polímero na zona de alimentação, prejudicando o transporte da matéria-prima
 - Favorecer a eliminação de gases pela garganta do funil de alimentação
- Iniciar normalmente com o valor médio de cada faixa de temperaturas sugerida para as zonas do canhão
- A temperatura da última zona do canhão (mais próxima do funil) deve ficar entre 40 a 50°C abaixo da temperatura de plastificação do polímero, para permitir um melhor transporte dos pellets.
- A zona de aquecimento do bico deve ser ajustada com a temperatura de injeção requerida, devendo manter a temperatura uniforme
- Deve-se realizar a verificação da qualidade do fundido para que seja determinado se o perfil de temperaturas utilizado é ou não adequado.
- Outra forma de avaliar se o perfil de temperatura determinado está correto é observando a pressão hidráulica durante a etapa de plastificação do polímero, a qual deve estar em torno de 75% da pressão máxima da injetora. Caso a pressão observada seja inferior a este valor deve-se reduzir a temperatura da última zona do canhão (em intervalos de $\pm 10^{\circ}\text{C}$) com tempos de estabilização de 10 a 15min antes que seja feita a próxima variação de temperatura. Uma vez que a última zona esteja ajustada, diminua a temperatura das zonas dianteiras de forma que as peças ainda tenham uma boa qualidade.

O objetivo deste ajuste é a obtenção de um fundido com boa qualidade com as menores temperaturas possíveis.

- Para materiais semicristalinos, deve-se observar o retorno do parafuso durante a plastificação. Caso o movimento seja irregular o calor fornecido pela última zona não é suficiente e pellets não fundidos podem estar entupindo a zona de compressão da rosca. Deve-se, portanto, aumentar a temperatura da última zona de forma que o movimento de retorno da rosca seja uniforme.

1.3 – Fatores que afetam o valor da temperatura do fundido



How shear heating happens...

Figura 2 - Fatores que influenciam na temperatura com a qual o polímero sai do bico da injetora.

1.4 – Necessidade da medição da temperatura do material que sai do bico da injetora

- Certificar-se que o calor introduzido no polímero resultou na temperatura desejada
- Determinar se a temperatura do polímero atingiu a temperatura de regime
- Deve ser medida periodicamente para aferição do valor da temperatura do polímero
- Realizada com o auxílio de pirômetros

1.5 – Programação do perfil de temperaturas em função da relação massa do moldado x capacidade de injeção da máquina injetora

- Se a massa do moldado for maior que 50% da capacidade de injeção da máquina injetora utiliza-se um perfil de temperaturas constante ou crescente da zona do bico para a zona da garganta de alimentação:
 - Permitir que o material absorva o calor necessário a uma plastificação adequada (tempo de residência muito curto)
- Se a massa do moldado for menor que 50% da capacidade de injeção utiliza-se um perfil de temperaturas decrescentes da zona do bico para a zona da garganta de alimentação:
 - Reduzir a quantidade de calor recebida pelo polímero durante sua permanência dentro do canhão (tempo de residência muito longo) evitando os riscos de degradação do mesmo

Obs.: Da observação da figura 3 podemos chegar a conclusão sobre o efeito da posição em que o material entra no canhão, exercendo influência na quantidade de calor que o mesmo recebe ao ser plastificado e, conseqüentemente, na qualidade do fundido que sai pelo bico da injetora, o que foi explicado acima.

1.6 – Ajuste da temperatura do molde

Os fornecedores de matérias-primas para o processo de injeção normalmente especificam as características e condições para o processamento de suas resinas, o que pode ser observado nas tabelas 1 e 2. Contudo, em muitas situações essas temperaturas (temperatura média da cavidade) não são respeitadas pelos fabricantes dos produtos injetados, que preferem trabalhar com temperaturas mais baixas que as especificadas com o objetivo de reduzir o tempo de ciclo, esquecendo-se que tais temperaturas podem exercer uma influência fundamental na qualidade da peça injetada.

Na abordagem dada a seguir são introduzidos conceitos e regras que visam auxiliar na determinação das condições que governam o resfriamento de um molde.

1.6.1 - Necessidade do controle da temperatura do molde

- Temperaturas determinadas pelos fabricantes são extensivamente testadas pelos mesmos, proporcionando a melhor qualidade ao produto moldado (tabelas 1, 2);
- Reduzir o tempo para que o molde atinja a sua temperatura de equilíbrio (figura 4)
- A temperatura do molde é de fundamental importância para as seguintes características do produto:
 - Aparência superficial
 - Contração
 - Tensões residuais
 - Uniformidade da estrutura morfológica do polímero injetado
 - Empenamentos

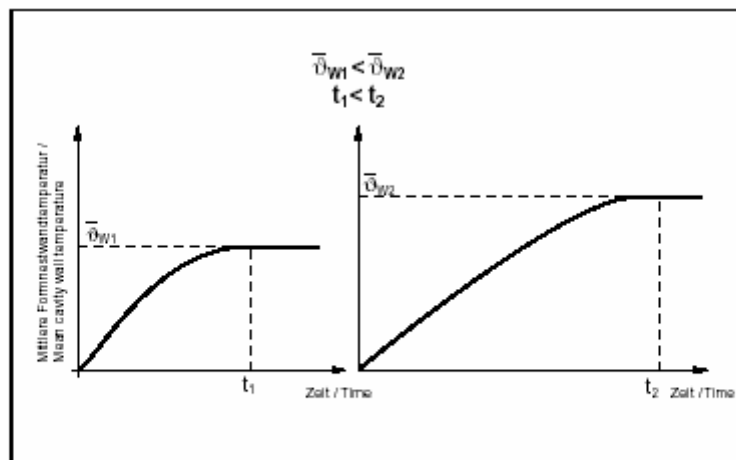


Bild 2: Formnehtemperatur, Einfahrphase mit (links) und ohne (rechts) Temperierung

Fig. 2: Cavity wall temperature, start-up phases with (left) and without (right) mould heating

Figura 4 - Tempo necessário para que o molde atinja sua temperatura de equilíbrio (e) com sistema de resfriamento, (d) sem sistema de resfriamento.

Como pode ser observado na figura 4, o tempo para um molde que não possua sistema de resfriamento, atinja a temperatura de regime (temperatura de trabalho) pode ser consideravelmente maior quando comparado a um molde que possua sistema de resfriamento, o que implicaria em maiores custos do processo (perdas com peças refugadas, tempo em que a máquina não estaria efetivamente produzindo, etc.). Além da temperatura média da cavidade ser maior, o que também implicaria em maior tempo de ciclo, o processo em algumas situações poderia ser inviabilizado caso a temperatura média da cavidade se estabilizasse em um valor próximo ao da temperatura de distorção do polímero que está sendo injetado.

Outro fator que também deve ser levado em consideração é a influência exercida pela temperatura do molde no grau de cristalização atingido pelo material injetado na cavidade, bem como na homogeneidade da estrutura cristalina ao longo da espessura da peça.

Para comprovarmos esse fato, podemos verificar na figura 5 e a influência da temperatura do molde na densidade e no grau de cristalização do material injetado na cavidade. Fica evidente da análise da figura 5 que para temperaturas do molde excessivamente baixas o grau de cristalização do material injetado cai rapidamente, o que pode produzir efeitos na peça acabada como, por exemplo, contração diferenciada e empenamentos, como veremos mais adiante, devido a efeitos de cristalização secundária.

Já na figura 6 observamos a influência da temperatura do molde na homogeneidade da estrutura cristalina ao longo da espessura da peça, a qual é bastante influenciada quando utilizamos temperaturas do molde muito baixas. O efeito resultante da não homogeneidade dessa estrutura pode também ser empenamentos e contração pós-moldagem, o que exerce uma influência negativa sobre o desempenho da peça injetada.

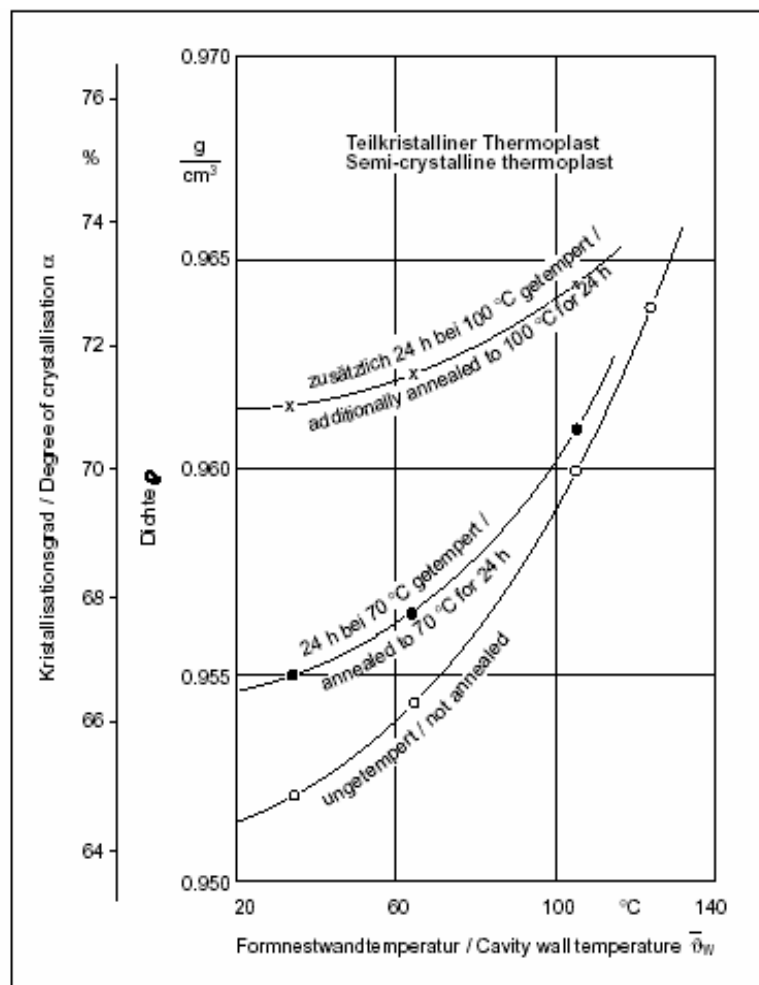


Bild 3: Einfluß der Formnestwandtemperatur und des Tempers auf die Dichte bzw. den Kristallisationsgrad von Spritzgußteilen [2]

Fig. 3: Influence of cavity wall temperature and annealing on the density and degree of crystallisation of injection moulded parts [2]

Figura 5 - Efeito da temperatura do molde no grau de cristalização alcançado pelos polímeros semicristalinos.

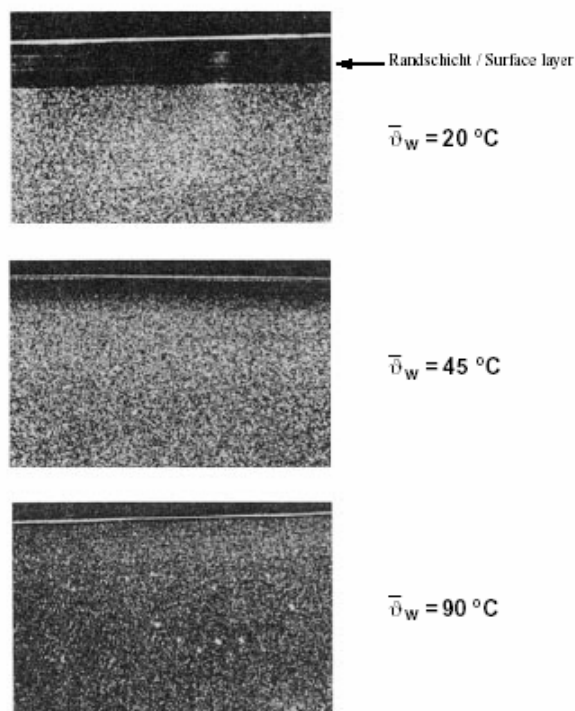


Figura 6 - Efeito da temperatura do molde na estrutura cristalina em peças moldadas em polipropileno.

Outro fator que deve ser levado em consideração quando ajustamos a temperatura do molde é o seu efeito sobre a contração de moldagem (aquela sofrida pela peça durante o seu resfriamento), bem como a sobre a contração pós-moldagem (aquela ocorrida durante a utilização da peça injetada e influenciada pelas condições de serviço da mesma) da peça moldada. Pode ser verificado na figura 7 que quando utilizamos temperaturas do molde mais altas ocorre um acréscimo na contração de moldagem sendo a contração pós-moldagem mais baixa. Contudo, para temperaturas do molde mais baixas a contração de moldagem tem uma redução significativa enquanto a contração pós-moldagem tem também um grande acréscimo. De forma geral a contração total, resultante na peça injetada, permanece praticamente inalterada para os dois casos, porém, no caso de temperaturas mais baixas, o efeito produzido na contração pós-moldagem pode tornar o desempenho da peça imprevisível, devido à possibilidade de alteração de forma da mesma durante sua vida útil, o que comprometeria sua aplicação.

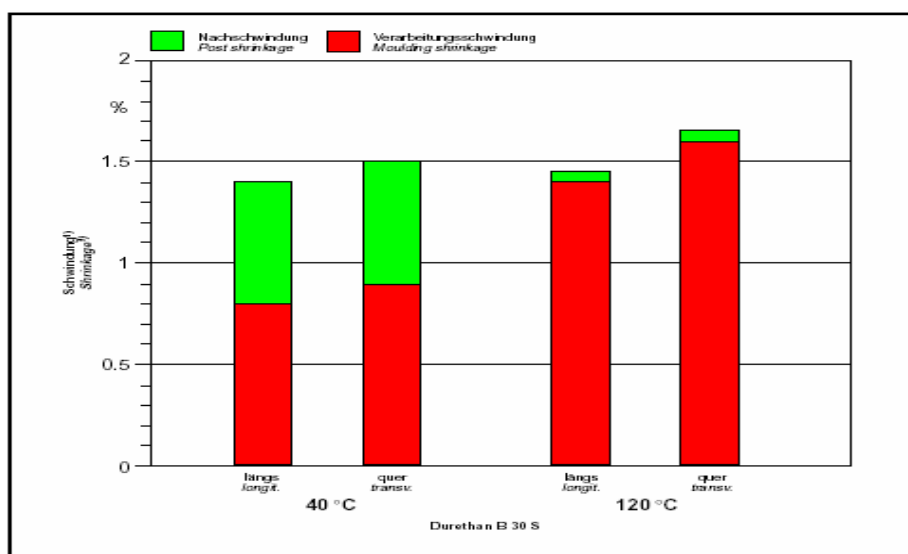


Figura 7 - Contração de moldagem e pós-moldagem em função da temperatura do molde

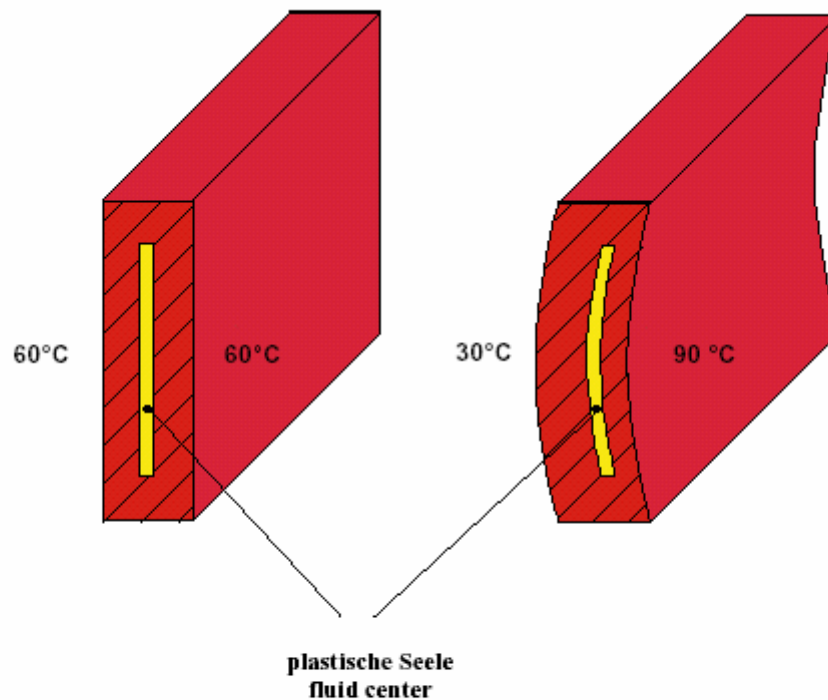


Bild 10: Einfluß der Formnestoberflächentemperatur auf den Verzug von unverstärkten Thermoplasten.

Fig. 10: Influence of the cavity surface temperature on the warpage of non-reinforced thermoplastics

Figura 8 - Influência da diferença entre as temperaturas dos lados de uma cavidade no empenamento de uma peça injetada.

Os parâmetros que controlam o resfriamento do molde devem ser ajustados de forma que não ocorram diferenças de temperatura entre as diferentes regiões de uma peça injetada, o que poderia produzir o empenamento da mesma. Tal fenômeno ocorre, no caso de peças como a apresentada na figura 8, devido ao deslocamento do seu núcleo fundido para regiões mais próximas do lado mais quente do molde. Ao resfriar e contrair, essa região produz tensões que levam ao empenamento da peça moldada. Portanto, deve-se controlar o resfriamento do molde de forma que este seja uniforme, e ao ser desmoldado, o produto apresente uma temperatura superficial o mais constante possível.

1.6.2 Variação da temperatura da cavidade ao longo do ciclo de injeção

Durante o ciclo de produção de uma peça injetada a parede da cavidade de um molde é sujeita a uma flutuação periódica de temperatura (apesar de desejar uma temperatura média que seja constante ao longo do tempo) que é inerente ao próprio processo e é influenciada por fatores como o material do molde, o polímero a ser injetado e pela temperatura do fundido, sendo que o ajuste das condições de resfriamento (temperatura do fluido e sua vazão) não influenciam esta variação.

Antes do início da injeção do material na cavidade a temperatura do molde está estabelecida em um valor T_{Wmin} . Quando o polímero entra na cavidade e toca a parede do molde este sofre um aquecimento sendo estabelecida muito rapidamente uma nova temperatura da superfície da cavidade, ou seja, $T_{Wmáx}$. A figura 9 mostra esse comportamento da temperatura da superfície da cavidade.

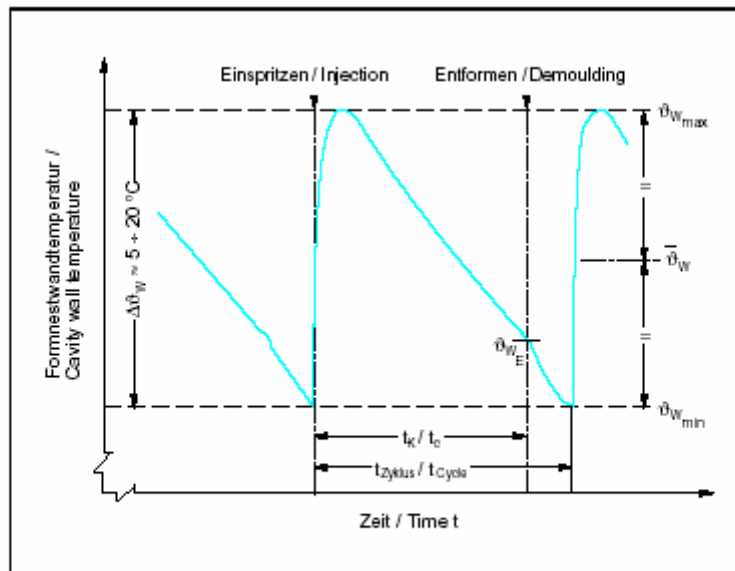


Bild 11: Temperaturen an der Formnestwand eines Spritzgießwerkzeuges bei ununterbrochener Produktion [7]

Fig. 11: Temperatures on the cavity wall of an injection mould during uninterrupted production [7]

Figura 9 - Oscilação da temperatura da superfície da cavidade durante o tempo de ciclo de uma peça injetada.

À medida que transcorre o tempo de ciclo, a temperatura volta a diminuir atingindo novamente o patamar que possuía antes do material entrar na cavidade.

A Temperatura de contato $T_{Wmáx}$ é função do coeficiente b (permeabilidade térmica) do molde e do polímero a ser injetado podendo ser estimada pela seguinte equação:

$$T_{Wmáx} = (b_w \cdot T_{Wmin} + b_m \cdot T_M) / (b_w + b_m), e$$

$$b = \sqrt{\rho \cdot \lambda \cdot c}$$

sendo,

T_{Wmin} – temperatura da cavidade antes do material ser injetado;

T_M – temperatura do fundido;

b – permeabilidade térmica;

b_w – permeabilidade térmica do material do molde;

b_m – permeabilidade térmica do polímero;

ρ - densidade;

λ - condutividade térmica;

c – calor específico.

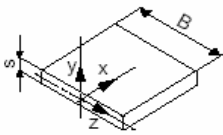
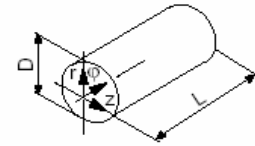
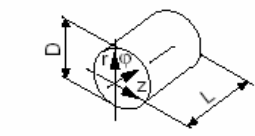
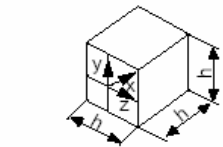
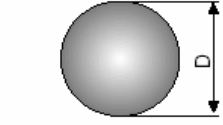
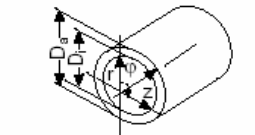
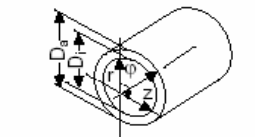
A partir dessa equação podemos estabelecer a temperatura máxima atingida pela cavidade, bastando apenas medir a temperatura da mesma após a extração da peça.

1.6.3 - Determinação do tempo de resfriamento de uma peça injetada

Com o objetivo de determinarmos o tempo de ciclo, torna-se necessário estabelecermos uma forma de realizar uma estimativa da duração do tempo de resfriamento de uma peça injetada. É necessário salientar também que as equações fornecidas a seguir determinam o tempo de resfriamento contado a partir do início do recalque, não levando em consideração, portanto, o tempo total em que o material está em contato com as paredes do molde. Desta forma, a tabela 3 fornece as equações para o cálculo de tempo de resfriamento para algumas geometrias onde,

T_K - estimativa do tempo de resfriamento;
 s - espessura de parede da peça injetada;
 a_{eff} - difusividade térmica efetiva (figura 10);
 $\vartheta_{M,W,E}$ - temperaturas do polímero, média da cavidade e média de extração;

Tabela 3 - Equações para o cálculo do tempo de ciclo para diferentes geometrias.

Geometrie / Geometry	Randbedingung / Boundary condition	Gleichung / Equation
	Platte / Plate $\dot{Q}_z = 0$ $\dot{Q}_x = 0$	$t_K = \frac{s^2}{\pi^2 \cdot a_{eff}} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{\vartheta_M - \bar{\vartheta}_W}{\bar{\vartheta}_E - \bar{\vartheta}_W} \right) \quad 1$ $t_K = \frac{s^2}{\pi^2 \cdot a_{eff}} \cdot \ln \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{\vartheta_M - \bar{\vartheta}_W}{\bar{\vartheta}_E - \bar{\vartheta}_W} \right) \quad 1a$
	Zylinder / Cylinder $\dot{Q}_\phi = 0$ $\dot{Q}_z = 0$ $L \gg D$	$t_K = \frac{D^2}{23.14 \cdot a_{eff}} \cdot \ln \left(0.692 \cdot \frac{\vartheta_M - \bar{\vartheta}_W}{\bar{\vartheta}_E - \bar{\vartheta}_W} \right) \quad 2$ $t_K = \frac{D^2}{23.14 \cdot a_{eff}} \cdot \ln \left(1.602 \cdot \frac{\vartheta_M - \bar{\vartheta}_W}{\bar{\vartheta}_E - \bar{\vartheta}_W} \right) \quad 2a$
	Zylinder / Cylinder $\dot{Q}_\phi = 0$ $L \sim D$	$t_K = \frac{1}{\left(\frac{23.14}{D^2} + \frac{\pi^2}{L} \right) \cdot a_{eff}} \cdot \ln \left(0.561 \cdot \frac{\vartheta_M - \bar{\vartheta}_W}{\bar{\vartheta}_E - \bar{\vartheta}_W} \right) \quad 3$ $t_K = \frac{1}{\left(\frac{23.14}{D^2} + \frac{\pi^2}{L} \right) \cdot a_{eff}} \cdot \ln \left(2.04 \cdot \frac{\vartheta_M - \bar{\vartheta}_W}{\bar{\vartheta}_E - \bar{\vartheta}_W} \right) \quad 3a$
	Würfel / Cube	$t_K = \frac{h^2}{3 \cdot \pi^2 \cdot a_{eff}} \cdot \ln \left(0.533 \cdot \frac{\vartheta_M - \bar{\vartheta}_W}{\bar{\vartheta}_E - \bar{\vartheta}_W} \right) \quad 4$ $t_K = \frac{h^2}{3 \cdot \pi^2 \cdot a_{eff}} \cdot \ln \left(2.064 \cdot \frac{\vartheta_M - \bar{\vartheta}_W}{\bar{\vartheta}_E - \bar{\vartheta}_W} \right) \quad 4a$
	Kugel / Sphere	$t_K = \frac{D^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot a_{eff}} \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{\vartheta_M - \bar{\vartheta}_W}{\bar{\vartheta}_E - \bar{\vartheta}_W} \right) \quad 5$
	Hohlzylinder / Hollow cylinder $\dot{Q}_\phi, \dot{Q}_z = 0$ $r < D_i/2$: $\dot{Q}_r = 0$	Gl. (1; 1a) mit $s = D_a - D_i$ / Eqn. (1; 1a) where $s = D_a - D_i$ 6
	Hohlzylinder / Hollow cylinder $\dot{Q}_\phi, \dot{Q}_z = 0$	Gl. (1; 1a) mit $s = (D_a - D_i)/2$ / Eqn. (1; 1a) where $s = (D_a - D_i)/2$ 7

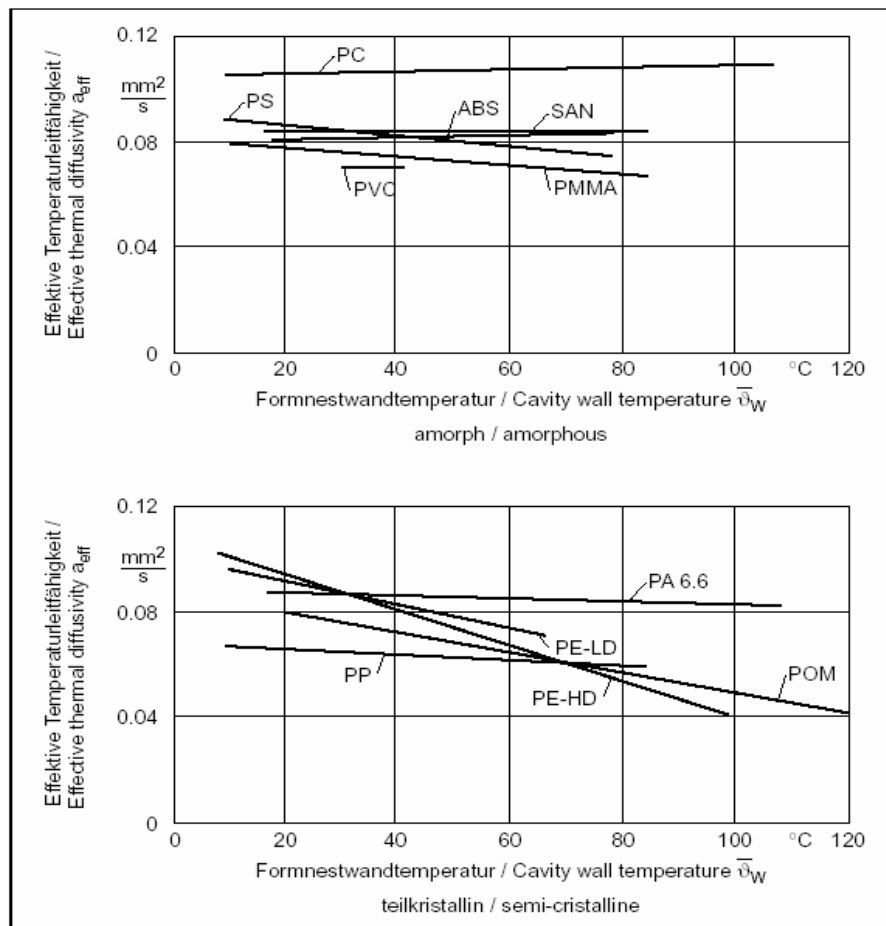


Figura 10 - Difusividade térmica efetiva em função da temperatura da cavidade para alguns termoplásticos.

Contudo, as equações presentes na tabela 3 levam em consideração a temperatura média da cavidade que pode ser obtida da seguinte expressão:

$$\bar{T}_W = \frac{T_{W \max} + T_{W \min}}{2}$$

A partir dessas relações podemos, portanto, estimar o tempo de resfriamento de uma peça injetada.

1.6.4 - Determinação da temperatura de extração média

Como regra geral, nenhuma peça injetada deveria ser extraída da cavidade até o momento em que a mesma esteja estável dimensionalmente, ou seja, não sofra distorção ou empenamento. Nessa situação até mesmo as cabeças dos pinos extratores poderiam produzir marcas na peça que seriam inaceitáveis.

A determinação da temperatura média de desmoldagem também é importante do ponto de vista econômico, pois como pode ser visto através da figura 14, quanto menor for a temperatura de desmoldagem maior será o tempo de ciclo, o que conseqüentemente leva a menores produtividades.

A temperatura média de desmoldagem ou extração é por definição a temperatura da região central na direção da espessura da peça no momento da extração da mesma. A figura 14 mostra também a influência dessa temperatura no tempo de resfriamento de uma peça injetada.

Como forma de determinarmos essa temperatura podemos, em primeiro lugar, recorrer a tabelas de fornecedores de matérias-primas (Tabela 4). Caso não existam, para o polímero em questão tais tabelas, podemos também estabelecer a temperatura de desmoldagem média de curvas de módulo de cisalhamento em função da temperatura do polímero, como a apresentada na figura 11.

Tabela 4 - Temperatura média de extração para alguns polímeros fornecidos pela Bayer.

Abbreviations	Thermoplastics	Mean demoulding temperatures (°C) (Guide values)*
PC-HT	Apec® HT	150
(PC+ABS)	Bayblend®	110
PA	Durethan®	100
PC	Makrolon®	130
ABS	Novodur®	90
PBT	Pocan®	130

Para garantirmos que a peça ao ser extraída da cavidade não seja deformada, a temperatura de desmoldagem média ou a temperatura no centro da parede da peça \bar{T}_E , não deve estar dentro da faixa onde o polímero possui a habilidade de escoar, não sendo capaz de suportar forças externas. Podemos então com o auxílio das curvas de módulo de cisalhamento (figura 11) determinar este valor. Nessa figura (característica de uma blenda de PC+ABS) vemos que o módulo de cisalhamento cai abruptamente quando a temperatura atinge aproximadamente 106°C, o que significa que a estabilidade dimensional acima dessa temperatura não pode mais ser garantida, sendo esta, portanto, sua temperatura de desmoldagem máxima. Tal temperatura está de acordo com a tabela 6, onde a temperatura de desmoldagem sugerida é de 110 °C.

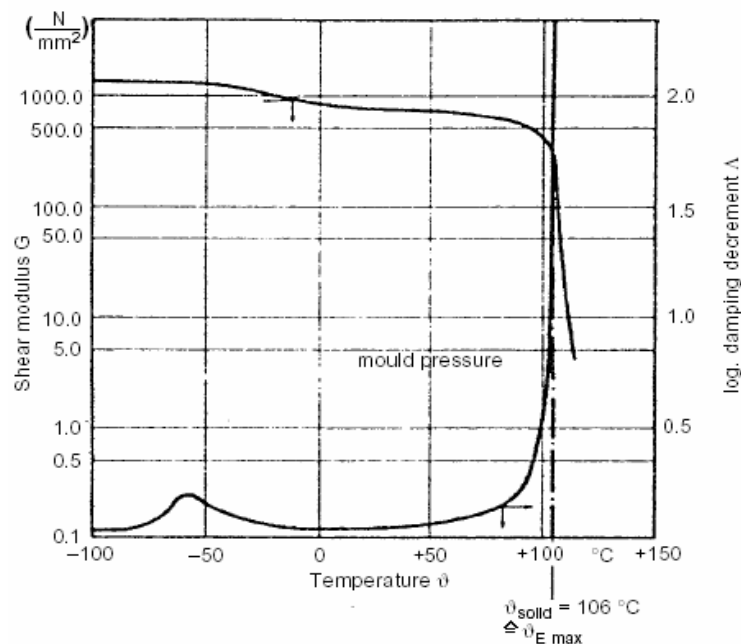


Figura 11 - Determinação da temperatura média de extração através das curvas de módulo de cisalhamento em função da temperatura do polímero.

Caso não sejam conhecidas as curvas de módulo de cisalhamento para o polímero em questão, podemos determinar a máxima temperatura de desmoldagem por meio de sua curva

pressão-volume-Temperatura (p-v-T). Para o caso de polímeros amorfos podemos utilizar como temperatura de desmoldagem a sua transição vítrea, e no caso de polímeros semicristalinos a sua temperatura de cristalização. Para a blenda PC+ABS considerada anteriormente, podemos verificar no diagrama p-v-T que sua transição vítrea ocorre em uma temperatura aproximada de 110°C, o que mostra uma excelente correlação com as curvas de módulo de cisalhamento e a tabela anteriormente apresentada.

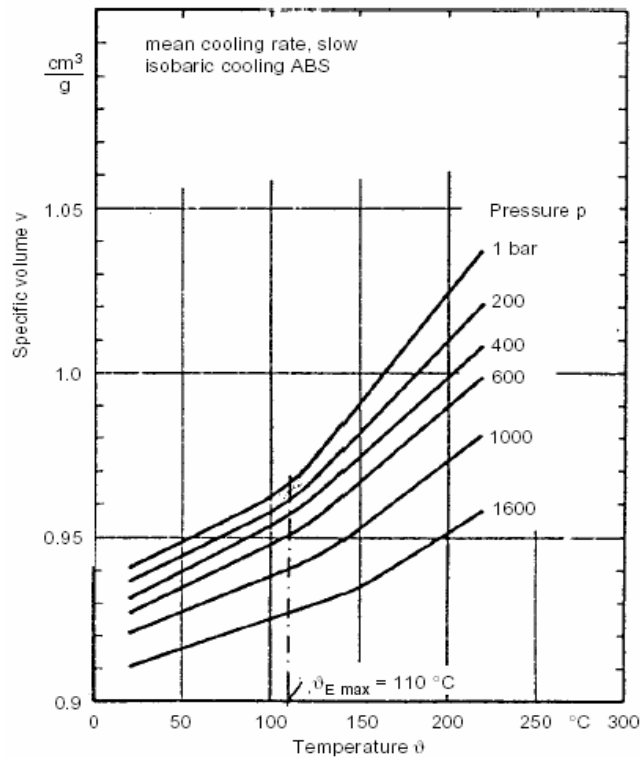


Figura 12 - Determinação da temperatura de extração média através das curvas p-v-T do polímero.

1.6.4.1 - Medição da temperatura de desmoldagem média

Como pode ser observado anteriormente, a temperatura de extração média representa um critério fundamental para a determinação do tempo de resfriamento bem como para a estabilidade dimensional da peça a ser desmoldada. Portanto, devemos realizar a medição da temperatura da peça desmoldada para verificarmos se tal temperatura foi ou não atingida.

Para realizarmos isso devemos, logo após a extração da peça, medir sua temperatura. Observaremos durante essa medição que a temperatura da peça sofrerá um rápido aumento atingindo um valor máximo (em virtude da equalização das temperaturas ao longo da espessura da peça), sendo que após atingir este máximo a temperatura cairá gradualmente (figura 13).

Esse máximo valor de temperatura medido será assumido, portanto, como a temperatura de desmoldagem média da peça. A medição da temperatura de desmoldagem não é importante apenas como uma forma de monitoramento do processo, porém, também como uma forma de avaliarmos e otimizarmos o sistema de resfriamento do molde, como será visto mais adiante. Devemos observar que um bom sistema de resfriamento deverá produzir uma temperatura de desmoldagem média o mais constante possível ao longo da peça.

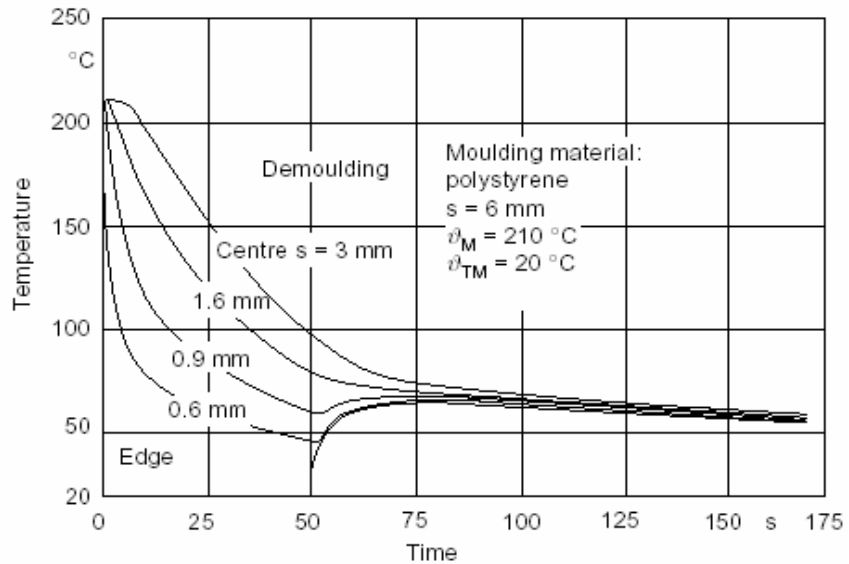


Figura 13 - Temperatura da superfície da peça em função do tempo antes a após a desmoldagem.

1.6.5 - Fatores que influenciam no tempo de resfriamento

Através das figuras abaixo podemos ver os fatores que influenciam no tempo de resfriamento e como os mesmos influenciam, de forma qualitativa, no tempo de resfriamento.

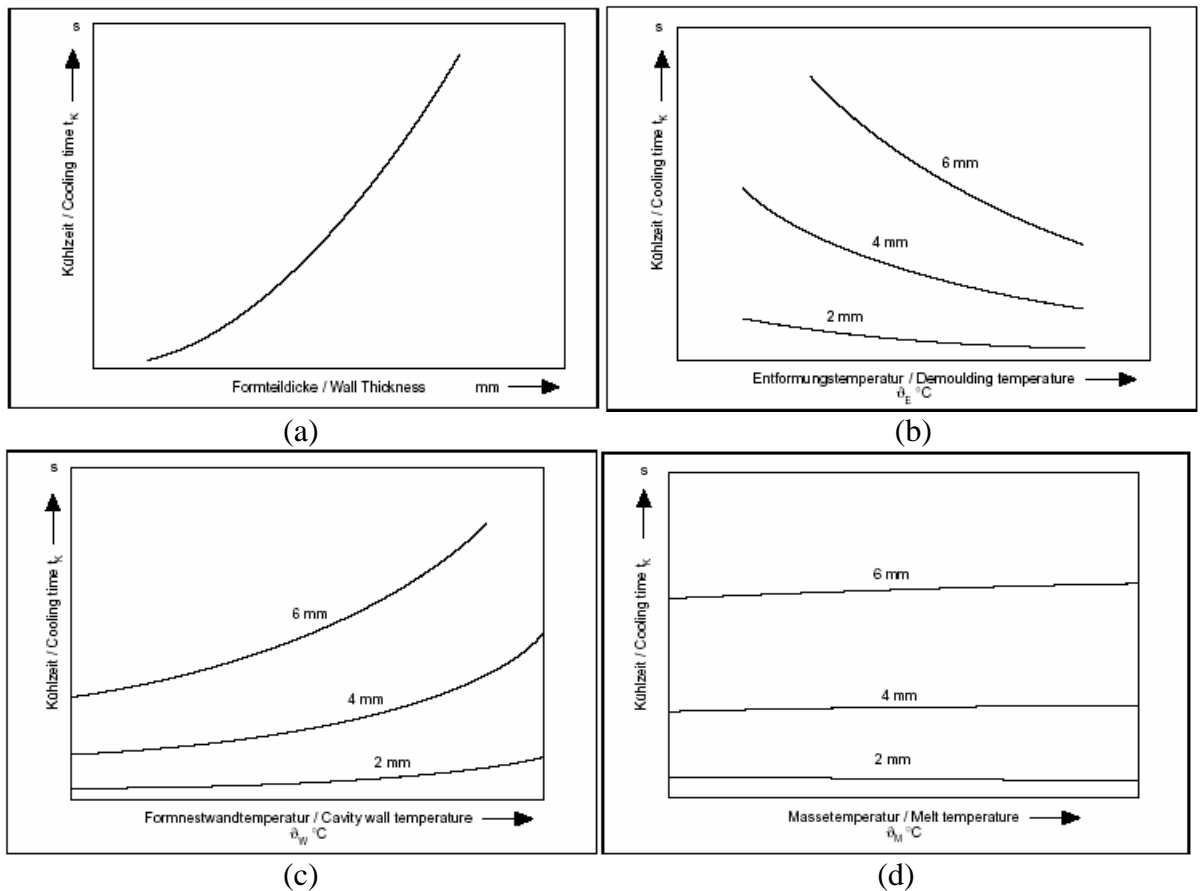


Figura 14 - Fatores que influenciam no tempo de resfriamento de uma peça injetada (a) espessura de parede da peça, (b) temperatura de extração da peça, (c) temperatura da parede da cavidade e (d) temperatura do fundido.

1.6.6 Como ajustar os parâmetros que controlam a temperatura do molde

- a - Da mesma forma que as temperaturas recomendadas para o polímero, o molde deve ser ajustado a partir de faixas de temperaturas recomendadas por fornecedores de matérias-primas (tabela 1 e 2), etc.
- b - Como ajuste inicial deve-se utilizar o valor médio de cada faixa.
- c - Deve-se tomar o cuidado de não ajustar a temperatura do fluido de resfriamento com o valor obtido acima, pois a temperatura média da parede cavidade da cavidade atinge um valor de equilíbrio maior que a temperatura ajustada para o fluido de resfriamento.
- d - Como valores orientativos (para uma programação básica), pode-se ajustar a temperatura do fluido de resfriamento para que o mesmo esteja a uma temperatura entre 10 e 20°C abaixo da requerida para a superfície da cavidade.
- e - ajustar a vazão total do fluido de resfriamento do molde de acordo com as equações abaixo:

- Cálculo da vazão

$$\dot{Q}_{TM} = +\dot{Q}_F + \dot{Q}_H - \dot{Q}_U \quad \text{Equação 1}$$

$$\dot{Q}_{TM} = \dot{m}_{TM} \cdot c_{TM} \cdot (\vartheta_{EIN} - \vartheta_{AUS}) \quad \text{Equação 2}$$

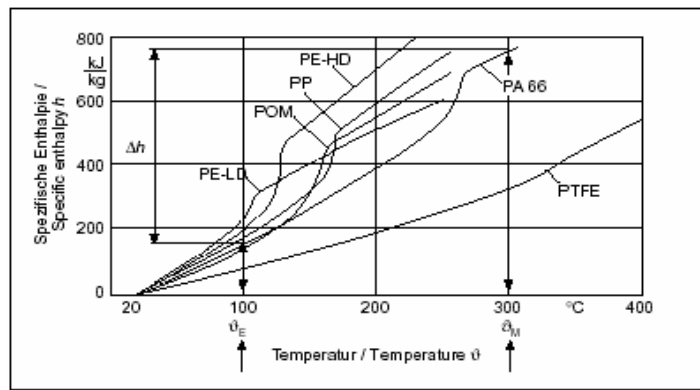
$$\dot{m}_{TM} = \frac{\dot{Q}_{TM}}{c_{TM} \cdot (\vartheta_{EIN} - \vartheta_{AUS})} \quad \text{Equação 3}$$

$$\dot{Q}_F = \frac{m \cdot \Delta h}{t} \quad \text{Equação 4}$$

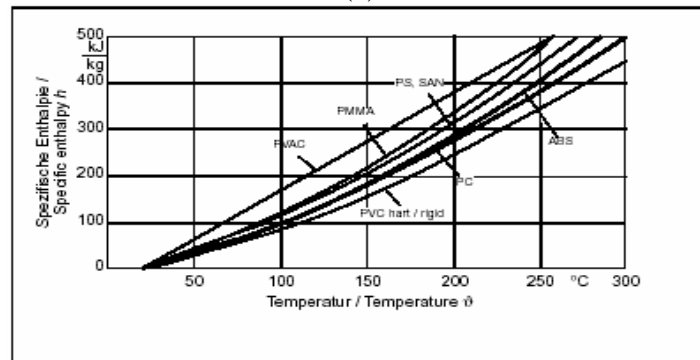
Através das equações acima podemos realizar o cálculo da vazão que deverá passar em todos os canais de resfriamento do molde de injeção. Como uma primeira aproximação, utilizaremos como vazão para cada canal de resfriamento a vazão total dividida pelo número de canais do molde em questão. Mais adiante iremos otimizar estas vazões em função das temperaturas medidas no molde e na peça injetada.

Pode ser demonstrado que a equação 1 representa o balanço geral de energia em um molde de injeção considerando os ganhos e as perdas de calor pelo molde. A equação 2 expressa que o calor recebido pelo molde deve ser retirado pelo sistema de resfriamento do mesmo. Já a equação 3 representa uma outra forma de expressar a equação 2, sendo apenas evidenciado o objetivo principal do cálculo, ou seja, a vazão de fluido de resfriamento do molde.

Contudo, em nossos cálculos iremos considerar que o único calor a ser cedido para o fluido de resfriamento do molde será o calor proveniente do polímero que é injetado na cavidade do molde, ou seja, \dot{Q}_F que pode ser calculado pela equação 4 onde m representa a massa total do moldado que entra no molde e Δh a diferença de entalpia (figura 15) do polímero na temperatura de injeção e na temperatura média de extração. Desta forma, substituiremos a equação 4 na equação 3 no lugar de \dot{Q}_{TM} , para a obtenção da vazão geral de fluido de resfriamento.



(a)



(b)

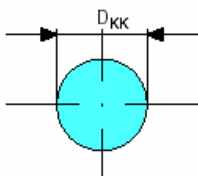
Figura 15 - Entalpia específica para polímeros semicristalinos (a) e amorfos (b).

- Determinação do número de Reynolds

O regime de escoamento do fluido de resfriamento dentro dos canais deverá ser sempre turbulento (número de Reynolds maior que 2300). Nessa situação o coeficiente de transferência de calor para o fluido de resfriamento aumenta, tornando a troca térmica entre este e o polímero dentro da cavidade mais eficiente.

Para garantirmos que o regime de escoamento do fluido de resfriamento é realmente turbulento, devemos tomar a vazão calculada anteriormente aplicando-a na seguinte relação:

Temperierkanaldurchmesser /
Diameter of heating/cooling
channel



Bedingung: turbulente Strömung => Reynolds-Zahl viel größer 2300 /
Condition: turbulent flow => Reynolds number much greater than 2300

$$Re = \frac{v_{TM} \cdot D_{KK}}{\nu_{TM}} \gg 2300 \quad (\text{dimensionslos / dimensionless}) \quad \text{mit / where } v_{TM} = \frac{4 \cdot \dot{m}_{PU}}{\pi \cdot D_{KK}^2 \cdot \rho_{TM}}$$

bei nicht kreisförmigem Kanalquerschnitt: hydraulischer Durchmesser (A: Querschnitt; U = Umfang) $D_{HY} = \frac{4 \cdot A}{U}$
with a non-circular channel cross-section: hydraulic diameter (A: cross-section; U = circumference)

Onde:

D_{KK} - diâmetro do canal de resfriamento do molde;

Re - número de Reynolds;

v_{TM} - velocidade de escoamento do fluido de resfriamento dentro dos canais;

ν_{TM} - viscosidade do fluido de resfriamento;

\dot{m}_{PU} - vazão de fluido de resfriamento nos canais;

ρ_{TM} - densidade do fluido de resfriamento;

D_{HY} - diâmetro hidráulico dos canais de resfriamento.

- f - Após um período de estabilização (aproximadamente uma hora) deve-se realizar uma medição da temperatura do molde (através de pirômetros) e, caso necessário, modificar a temperatura e/ou vazão do fluido de resfriamento do molde.
- g - Em moldes que trabalham acima da temperatura ambiente pode ser necessário um pré-aquecimento.
- h - A diferença de temperatura entre a entrada e a saída do fluido de resfriamento deve ser a menor possível e como valores de referência podemos utilizar entre 2°C (para peças técnicas que possuem tolerâncias mais apertadas) a 5°C.

1.7 – Temperatura do óleo da injetora

- Ajustar a temperatura indicada pelo fabricante do equipamento esperando, preferencialmente, até que a temperatura atinja o valor programado antes de iniciar a produção

1.8 – Temperatura da garganta de alimentação

- Ajustar a vazão de água para o resfriamento desta região, de forma que o valor resultante seja o recomendado (se houver) pelo fabricante.

2 - DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS PARA A PROGRAMAÇÃO DA PLASTIFICAÇÃO

2.1 – Curso de dosagem

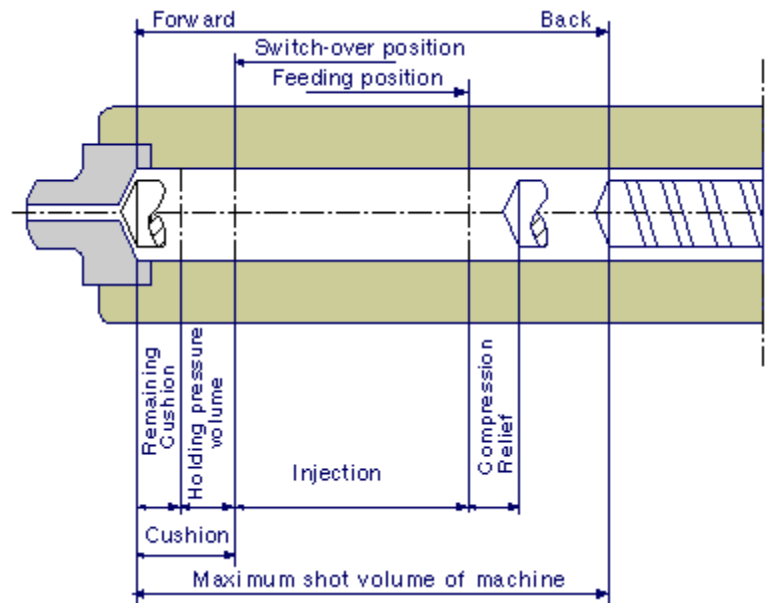


Figura 16 - Representação

É o curso (de recuo do parafuso) necessário para produzir o preenchimento volumétrico, a pressurização e o recalque do fundido dentro da cavidade do molde.

- **Estimativa do curso de dosagem total**

$$L_T = L_p + L_{press.} + L_{rec.} + L_c, \text{ onde:}$$

L – curso de dosagem total;

L_p – curso de dosagem para o preenchimento volumétrico;

$L_{press.}$ – curso de pressurização;

$L_{rec.}$ – curso de recalque;

L_c – curso do colchão.

- **Curso de dosagem em função da massa do moldado**

$$L = 4 \cdot W / \pi \cdot D^2 \cdot \rho, \text{ onde:}$$

W – massa do moldado em g;

D – diâmetro do parafuso em mm;

ρ - massa específica em g/cm^3 na temperatura de processamento do polímero.

Obs.: Nesse caso L é o curso utilizado para o preenchimento, pressurização e o recalque da peça.

- **Curso de pressurização**

$$L_{press.} = 0,1 \text{ a } 0,15 \times L_p$$

- **Curso de recalque**

$$L_{rec} = 0,15 \text{ a } 0,25 \times L_p$$

- **Colchão**

$$L_c = \text{até } 0,1 \times (L_p + L_{press.} + L_{rec})$$

Obs.: Podemos também determinar o curso de dosagem para um molde por meio de tentativas, com o molde já instalado na injetora. Nesse método, inicia-se com um valor de dosagem pequeno (inferior ao esperado para o preenchimento da cavidade), aumentando-se este valor até que a cavidade seja quase totalmente preenchida (aproximadamente 95%), sendo este valor utilizado como curso de preenchimento (L_p). Após a determinação deste valor podemos aplicar a equação para o curso de dosagem, substituindo o valor encontrado anteriormente na mesma.

2.2 – Determinação do colchão

Para a maioria dos casos, deve-se ajustar o curso de dosagem de forma que o no final do recalque reste uma sobremedida de material à frente do parafuso, a qual é designada de colchão. Sua principal função é garantir que a pressão de recalque será aplicada à peça até o fim do tempo de recalque, o que garante uma qualidade mais uniforme da peça, evitando a presença de vazios e rechupes na mesma.

Em injetoras de pequeno porte esse colchão pode ser de 3mm sendo de 9mm para injetoras de maior porte. Contudo, os valores utilizados para a maioria dos casos devem estar em torno de 10% do curso necessário para preencher, pressurizar e recalcar a peça injetada.

Cuidados devem ser tomados para que não seja programado um colchão excessivamente grande (especialmente com materiais sensíveis a temperaturas elevadas) o que elevaria o tempo de residência do material no canhão, podendo produzir sua degradação. Em máquinas de ciclo rápido (injeção de peças finas) normalmente não se utiliza colchão, pois isso poderia ocasionar a formação de rebarbas na peça injetada.

2.3 – Determinação dos valores de contrapressão

Contrapressão é a pressão aplicada na região traseira do cilindro de injeção durante a realização da etapa de dosagem do material.

A contrapressão tem como funções:

- Melhorar a homogeneização da massa fundida, devido ao efeito de mistura (principalmente quando são utilizados aditivos ao polímero base);
- Eliminação de bolhas de ar ou gases dispersos no material fundido, minimizando os efeitos negativos da presença desses gases na peça injetada;
- Aumentar a temperatura do fundido devido ao maior atrito sofrido pelo polímero durante a plastificação.

Para a maioria dos casos valores de 4 a 7 bar de contrapressão são eficientes para tornar o polímero mais homogêneo sem produzir seu superaquecimento. Contudo, valores muito mais elevados podem ser utilizados na moldagem de materiais com agentes expansores incorporados ao polímero, ou como forma de minimizar as marcas na superfície da peça, causadas pela presença de umidade no material. Os valores máximos utilizados de contrapressão estão também relacionados ao diâmetro do parafuso e a rotação do para fuso, não devendo, contudo, exceder a 20% da pressão máxima da injetora.

Cuidados especiais devem ser tomados no processamento de materiais que contenham agentes retardadores de chama, fibras de vidro, pigmentos, bem como blendas para que os valores de contrapressão não ultrapassem 10bar.

Alguns equipamentos permitem o ajuste dos valores de contrapressão através de um perfil variável, durante a etapa de dosagem.

No caso de existir esta opção na injetora utilizada, pode-se produzir um leve aumento da contrapressão para compensar a redução do comprimento efetivo do parafuso durante a plastificação, o que produziria uma redução do calor introduzido no polímero.

2.4 – Determinação da descompressão

A descompressão é o alívio da pressão existente no material dosado, que se encontra à frente do parafuso, produzida pelo seu recuo, o que ocorre mediante um valor programado.

Sua função é evitar que o material vaze pelo bico da injetora, seja para dentro do molda no caso do bico permanecer encostado na bucha, ou mesmo para fora, quando a unidade injetora for recuada durante o ciclo de injeção.

O valor desse recuo do parafuso deve ser programado de forma que o material deixe de vaziar sem, contudo, introduzir uma quantidade excessiva de ar para dentro do canhão, o que se injetado junto com o polímero prejudicaria a qualidade da peça.

A sua determinação é realizada baseada na tentativa e erro, bastando observar o valor programado que reduz ou elimina o vazamento.

Alguns polímeros, por possuírem alta fluidez (PET, PA6, etc) necessitam a utilização de bicos valvulados para evitar seu vazamento, visto que valores de descompressão muito elevados seriam necessários para estes casos.

2.5 – Determinação da rotação do parafuso

De maneira análoga à programação da temperatura do fundido, os valores de velocidade de rotação do parafuso devem ser extraídos também de fontes como fornecedores de matérias-primas, handbooks etc.

Esses valores de rotação estão associados aos valores de velocidade tangencial ao qual o polímero deve ser submetido para que seja adequadamente plastificado sem sofrer degradação. Baseado nesses valores pode-se calcular a rotação do parafuso através da seguinte expressão:

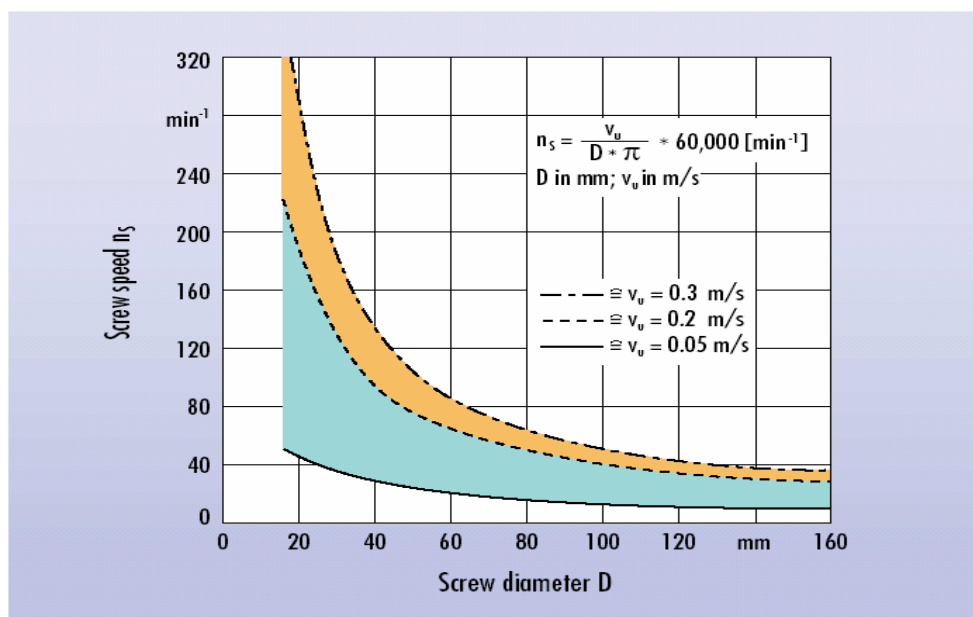


Figura 17- Gráfico para a determinação das rotações do parafuso em função do seu diâmetro.

$$N = V_t \cdot 60 / \pi \cdot D, \text{ onde:}$$

N – rotação do parafuso;

V_t – velocidade tangencial do parafuso recomendada para o polímero;

D – diâmetro do parafuso.

Um ponto importante a ser considerado para a velocidade de plastificação é que os valores programados devem resultar em um tempo de plastificação levemente inferior ao intervalo de tempo entre o fim do recalque e o fim do resfriamento.

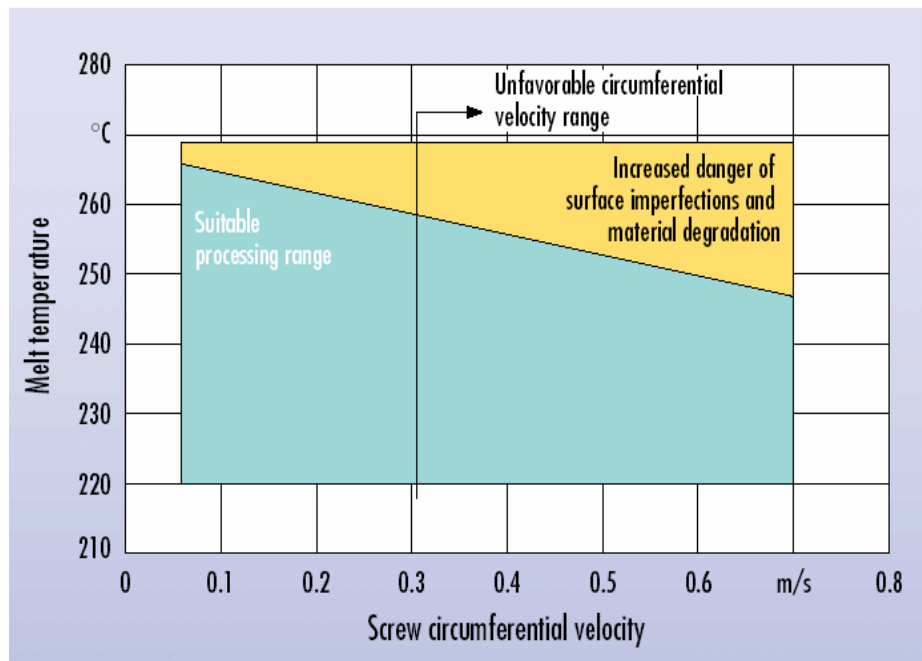


Figura 18- Efeito da velocidade tangencial do parafuso sobre a temperatura do polímero.

3 – DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROGRAMAÇÃO DA INJEÇÃO E DO RECALQUE

3.1 – Fatores que determinam a velocidade de injeção ótima

a – Temperatura

Por razões de qualidade, a temperatura média do polímero ao longo do moldado deve ser mantida a mais constante possível (durante o preenchimento do molde). No entanto, para altas velocidades de injeção a temperatura do polímero na região de fim de fluxo pode ser maior que a temperatura com a qual o material entra na cavidade. Já para velocidades de injeção mais baixas ocorre o contrário, sendo a temperatura nas regiões de fim de fluxo mais baixa.

b – Pressão de injeção

A utilização de velocidades de injeção elevadas resulta em altas perdas de pressão devido à vazão volumétrica desenvolvida. Contudo, velocidades de injeção muito baixas levam também a pressões de injeção elevadas (aumento da viscosidade e da espessura da camada solidificada). Idealmente, a pressão de injeção resultante da velocidade empregada, deve estar entre esses dois

limites (preferencialmente o menor valor encontrado) correspondendo ao ponto ótimo (com relação à qualidade da peça) de operação.

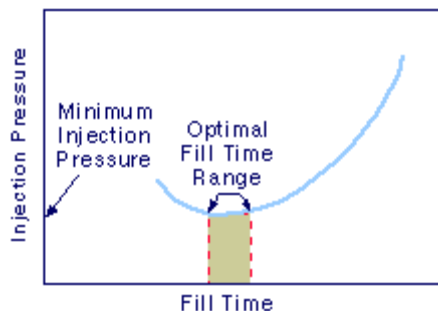


Figura 19- Relação entre a pressão de injeção (variável dependente) e tempo de injeção (variável independente).

3.2 – Estimativa da velocidade de injeção

Na maioria dos casos, os tempos de injeção utilizados estão dentro do limite de 1 a 3s, o que para uma programação básica pode ser utilizado como referência.

Contudo, em algumas situações podemos ter que utilizar tempos mais baixos ou mais altos que os estabelecidos acima. Situações como a injeção de peças com paredes finas, peças espessas ou peças grandes, e para contornar problemas de moldagem podem requerer valores diferentes dos recomendados anteriormente.

3.3 – Determinação do perfil de velocidade de injeção

Usualmente a fase de injeção é realizada sob condições de velocidade controlada. Isso significa que o parafuso empurra o material plastificado para dentro da cavidade mediante um perfil de velocidades, as quais podem ser programadas com valores diferenciados.

Normalmente, o início do preenchimento da cavidade deve ser feito com uma velocidade de avanço do parafuso mais lenta, aumentando-se a velocidade à medida que o polímero preenche a cavidade do molde. Contudo, no final do preenchimento volta-se a diminuir a velocidade de injeção.

Essa técnica é utilizada para minimizar os efeitos da orientação molecular na qualidade superficial da peça, bem como permitir uma transição mais suave para o recalque.

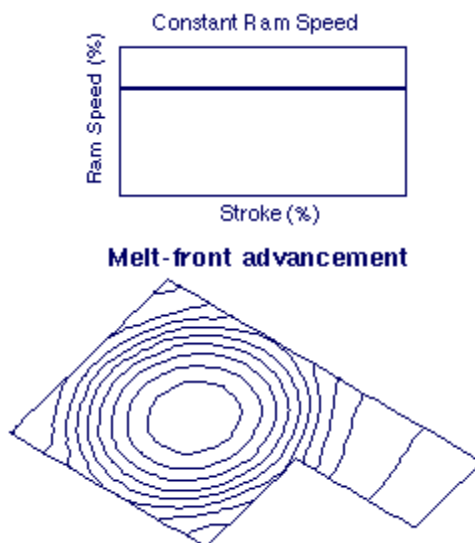


Figura 20 - Representação do avanço da frente de fluxo do polímero para um perfil de velocidade do parafuso constante.

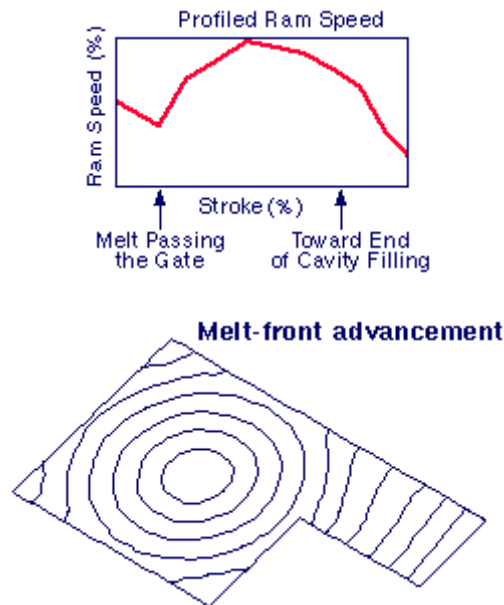


Figura 21 - Representação do avanço da frente de fluxo do polímero para um perfil de velocidade do parafuso variável.

3.4 – Determinação da pressão de injeção

Os valores de pressão devem ser programados para manter a velocidade de injeção de terminada. No entanto, para a programação inicial deve-se iniciar com valores mais baixos de pressão (30 a 50% da pressão máxima da injetora) aumentando-os quando velocidades de injeção mais elevadas forem necessárias.

3.5 – Determinação do ponto de comutação (comutação por posição)

De acordo com a expressão $L = L_p + L_{press.} + L_{rec.} + L_c$, podemos determinar o ponto de comutação da seguinte maneira:

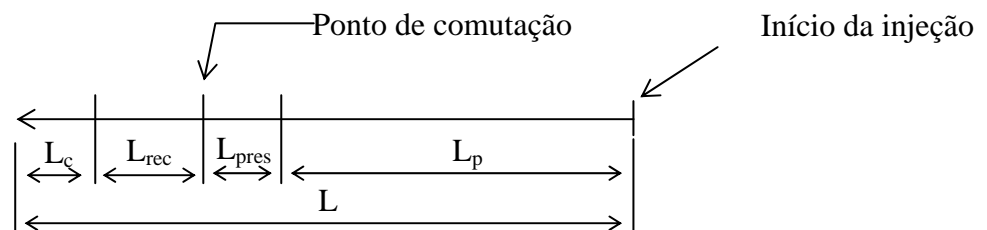


Figura 22 - Determinação da posição do ponto de comutação para o recalque.

3.6 – Determinação da pressão de recalque

O recalque tem como funções compensar a contração da peça que está resfriando na cavidade, bem como manter a pressão aplicada na cavidade até que o ponto de injeção solidifique, para que o material que está dentro da cavidade não retorne pelos canais de alimentação.

Para realizar essas funções, são utilizados valores de pressão de recalque que variam de 40 a 80% da pressão de injeção utilizada. Contudo, para obter uma peça de qualidade devemos otimizar esses valores levando em consideração as características do produto e as condições de processamento, ou seja, a pressão de recalque final pode ser maior ou menor que os valores recomendados.

3.7 – Determinação do perfil de pressão de recalque

O resfriamento do polímero, que ocorre durante o recalque, é acompanhado por uma queda de pressão na cavidade do molde. Como resultado desse fenômeno, podemos, no lugar de programar uma pressão de recalque constante, programar um perfil de pressão de recalque que inicie com os valores discutidos no item anterior, reduzindo-os à medida que transcorre o tempo de recalque.

Além de significar uma economia de energia no processo (5 a 10%), são também minimizados os efeitos de uma pressão de recalque elevada sobre a peça (tensões residuais, rebarbas, etc), o que poderia comprometer a qualidade do produto.

3.8 – Determinação do tempo de recalque

Como exposto anteriormente, o tempo de recalque ideal é aquele que permite a solidificação do ponto de injeção da peça.

Como meios para determinar esse tempo podemos utilizar dois métodos:

a – utilizando as equações para o cálculo do tempo de resfriamento de uma peça;

	<p>Platte / Plate $\dot{Q}_Z = 0$ $\dot{Q}_X = 0$</p>	$t_K = \frac{s^2}{\pi^2 \cdot a_{\text{eff}}} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{\vartheta_M - \bar{\vartheta}_W}{\bar{\vartheta}_E - \bar{\vartheta}_W} \right) \quad 1$
	<p>Zylinder / Cylinder $\dot{Q}_\varphi = 0$ $L \sim D$</p>	$t_K = \frac{s^2}{\pi^2 \cdot a_{\text{eff}}} \cdot \ln \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{\vartheta_M - \bar{\vartheta}_W}{\bar{\vartheta}_E - \bar{\vartheta}_W} \right) \quad 1a$
		$t_K = \frac{1}{\left(\frac{23.14}{D^2} + \frac{\pi^2}{L} \right) \cdot a_{\text{eff}}} \cdot \ln \left(0.561 \cdot \frac{\vartheta_M - \bar{\vartheta}_W}{\bar{\vartheta}_E - \bar{\vartheta}_W} \right) \quad 3$
		$t_K = \frac{1}{\left(\frac{23.14}{D^2} + \frac{\pi^2}{L} \right) \cdot a_{\text{eff}}} \cdot \ln \left(2.04 \cdot \frac{\vartheta_M - \bar{\vartheta}_W}{\bar{\vartheta}_E - \bar{\vartheta}_W} \right) \quad 3a$

Obs.: Para o cálculo do tempo de recalque deve-se substituir a temperatura de extração média pela temperatura de solidificação do polímero, pois após a solidificação do mesmo, no ponto de injeção, o material não mais entrará na cavidade encerrando o recalque da peça.

b – observando a variação da massa da peça à medida que aumentamos o tempo de recalque.

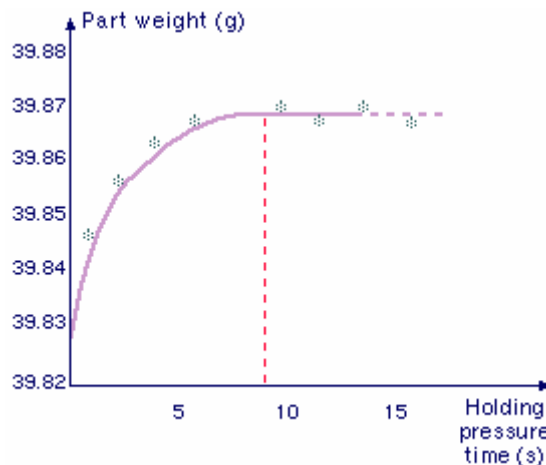


Figura 23 - Aumento da massa da peça em função do tempo de recalque utilizado.

4 – Determinação das variáveis do ciclo seco da máquina

4.1 – Determinação do curso de abertura do molde

O tamanho do curso de abertura também exerce influência no tempo de ciclo de uma injetora. Desta forma, este curso deve ser o menor possível.

Uma forma de estimarmos o curso de abertura é através da expressão abaixo, sendo que na figura 17 podemos observar o curso necessário para a abertura do molde.

$C_a = 2h_p + h_c + (50 \text{ a } 100\text{mm})$, onde:

C_a - Curso de abertura do molde;

h_p - Altura da peça injetada;

h_c - Altura do canal da bucha.

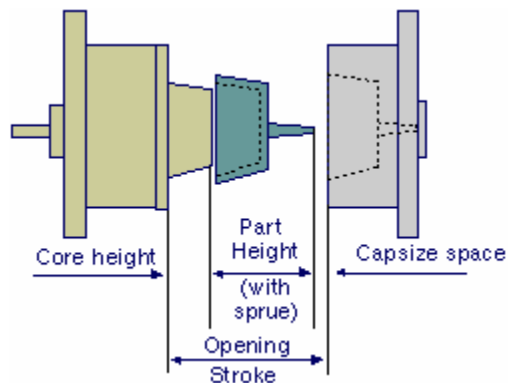


Figura 17 - Determinação do curso de abertura do molde.