

¹ INFLUÊNCIA DO PROJETO DA REFRIGERAÇÃO NA PERFORMANCE DE UM MOLDE DE INJEÇÃO PLÁSTICA.

(II) Mário Sonsino Carneiro

1 RESUMO

Este trabalho têm por objetivo apresentar e debater como diferentes fatores no projeto do sistema de refrigeração de um molde de injeção pode influenciar sua performance quanto ao tempo de ciclo na fabricação de um produto plástico. A metodologia empregada discorre sobre a condução de calor que ocorre em uma ferramenta de injeção plástica e as diferentes etapas que influenciam no processo, sendo :

- A condução do calor através do termoplástico fundido;
- A condução do calor através do metal utilizado na construção do molde;
- A transferência de calor através do fluido de refrigeração.

Os diversos parâmetros são elencados e estudados em modelos hipotéticos com o auxílio da simulação de injeção usando o software Moldflow. Espera-se, com o auxílio da simulação, possibilitar projetos de refrigeração mais eficientes que permitam melhor performance na fabricação de produtos plásticos e mais qualidade ao desenvolvimento de moldes de injeção.

Palavras-Chave: refrigeração, moldflow, injeção de plástico

⁽¹⁾ 2º Encontro da Cadeira de Ferramentas, Moldes e Matrizes - 21 a 23 de setembro de 2004 ABM – São Paulo - SP

^(II) *Mário S. Carneiro ; Gerente de Produto – Plásticos ; Smarttech Serviços e Sistemas Ltda.*

2 INTRODUÇÃO

A Fabricação de peças plásticas injetadas exige o controle de diversos parâmetros de projeto para garantir a qualidade do produto e a produtividade conforme planejado. São alguns deles: - a matéria prima selecionada; - a máquina injetora disponível; - a distribuição de espessuras do produto e, por fim, o projeto do molde de injeção.

No projeto do molde, a posição e o número de pontos de injeção, o dimensionamento de canais e entradas, o sistema de extração do molde e o sistema de refrigeração são, muitas vezes, definitivos para viabilizar um produto plástico injetado.

Neste estudo é considerada a influência do sistema de refrigeração do molde na viabilidade técnica e econômica do produto injetado. Existem diversas opções no projeto do molde que podem ser combinadas para resultar nos menores tempos de ciclo sem prejudicar a qualidade final do produto.

A premissa básica para entender a inter-relação entre o projeto da refrigeração e a performance da fabricação está na troca de calor que ocorre entre o material termoplástico fundido na cavidade e as paredes e circuitos de refrigeração do molde. A transferência de calor no molde se dá em três etapas a saber :

- Taxa de Transferência de calor do centro da espessura do produto para a parede do molde (através do termoplástico);
- Taxa de Transferência de calor das paredes da cavidade para a superfície interna dos circuitos de refrigeração (através do metal do molde);
- Transferência de calor da superfície do circuito para o fluido refrigerante (através do fluido de refrigeração).

Durante o desenvolvimento do trabalho são realizadas todas as considerações que influenciam na transferência de calor e na performance da fabricação quanto à produtividade.

O Método utilizado para quantificar as parcelas de troca de calor e visualizar a dinâmica do processo consiste no uso de um software de simulação de injeção (Moldflowtm). O impacto da mudança de parâmetros como espessura de produto, matéria prima, temperatura de molde, design de circuitos entre outros no tempo de congelamento da peça é medido e qualificado.

Por **tempo de congelamento** entende-se o tempo necessário para que todos os pontos da peça moldada ao longo de sua espessura tenham a temperatura igual ou menor que a temperatura de extração indicada para o material termoplástico. Esta então é considerada como premissa básica para permitir a extração do produto do molde e conclusão de um ciclo.

3 DESENVOLVIMENTO

O calor transferido do polímero fundido para o molde se dá ao longo das fases de preenchimento, recalque e resfriamento do ciclo de injeção. A maior parte deste

calor é extraído da cavidade durante o “tempo de contato”, compreendido pela soma dos tempos de recalque e resfriamento, conforme ilustrado na figura abaixo :



Figura 1 – Composição dos tempos do ciclo de injeção

Definidos os momentos em que se realiza a extração do calor, a forma como a troca de calor ocorre é então discutida. O calor é perdido para o meio através do ar ambiente, por convecção natural; através das placas da máquina injetora por condução; por radiação para o ambiente e por condução e convecção para os circuitos de refrigeração do molde, conforme ilustra a figura abaixo :

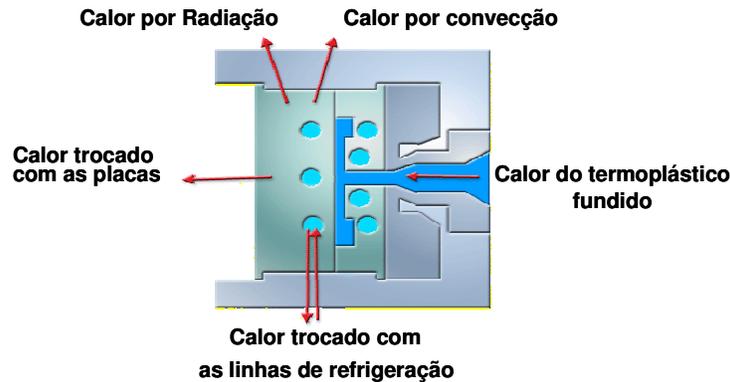


Figura 2 – Troca de calor com o meio

Estudando as etapas que compõem o resfriamento do material dentro do molde e conseqüente solidificação da peça dividimos o processo em :

3.1 Taxa de Transferência de calor entre o termoplástico e as paredes do molde (através da espessura do produto)

O Material termoplástico pode ser considerado como isolante térmico quando comparado aos metais. Por esse motivo, esta etapa do processo da transferência de calor é a principal responsável pela definição do tempo de contato para completa solidificação do produto.

Os fatores que influenciam na transferência de calor através da espessura do produto são os seguintes :

- Propriedades térmicas da matéria prima termoplástica
 - Calor Específico ;
 - Condutividade Térmica ;
- Espessura do Produto;

- Diferença de temperaturas entre as paredes do molde e o material fundido.

3.1.1 Propriedades térmicas da matéria prima termoplástica

Calor específico representa a quantidade de calor necessário para elevar ou reduzir a de $1^{\circ}C$ uma unidade de massa de uma substância. Com esta definição podemos verificar uma relação direta entre o calor específico do material e a velocidade de resfriamento de uma peça.

Foi realizada uma simulação em um modelo de peça hipotético correspondente a um cilindro de **2 mm** de espessura utilizando dois materiais (Policarbonatos) com calores específicos diferentes e condutividade térmica iguais, conforme ilustrado na figura abaixo:

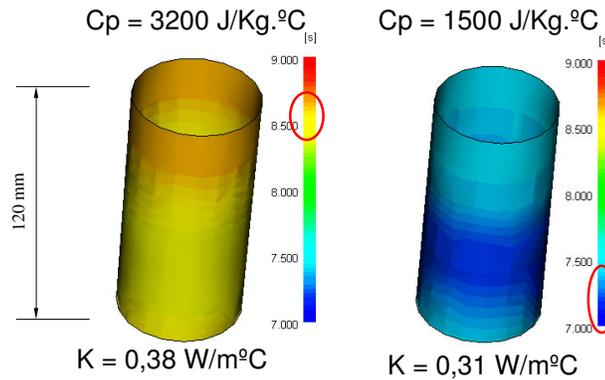
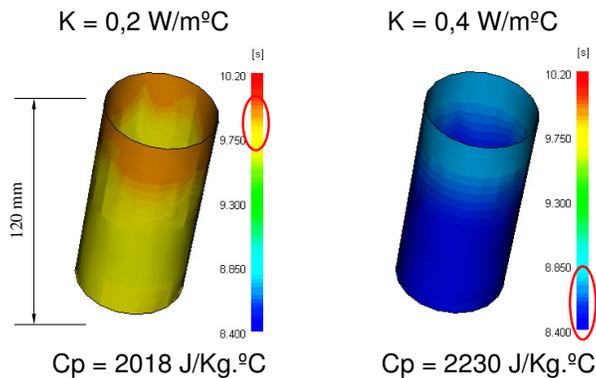


Figura 3

Observando :
observamos, no pri
específico de 1500
7,3 seg.

A Condutidã
unidade de calor no tempo dado uma diferença de temperatura de 1°C entre dois pontos distanciados de uma unidade de distância (metros). Simulando o mesmo modelo, nas mesmas condições, selecionando agora dois policarbonatos com calores específicos próximos e diferentes condutividades térmicas observa-se o impacto no tempo de congelamento, sendo:



Figura

Verifica-se então uma redução de ~10 Segundos para ~8,5 segundos no tempo necessário de congelamento da peça a partir do aumento da condutividade térmica da matéria prima.

3.1.2 – Espessura do produto

Ainda associada às propriedades térmicas, o aumento da espessura de um produto plástico injetado potencializa o isolamento térmico. Isso aumenta a quantidade de calor a ser extraída da cavidade para que a peça injetada possa atingir a temperatura de extração. Em um novo modelo hipotético, variou-se a espessura do produto de 1 até 3 mm, verificando o impacto desse aumento no tempo de congelamento da peça.

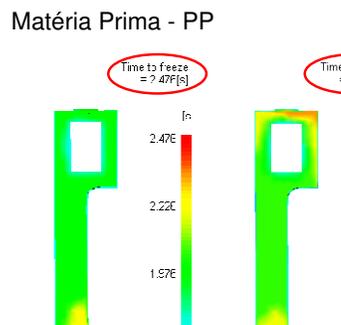


Figura 5 – Influência de espessura no tempo de congelamento

Observando a legenda das figuras, classificam-se os tempos máximos ao longo da peça, necessários ao completo congelamento sendo 2,5 ; 8,6 e 17,9 segundos respectivamente para espessuras de 1, 2 e 3 mm.

3.1.3 – Diferenças de temperatura entre as paredes do molde e o fundido

A diferença de temperatura é o potencial que gera a extração do calor de um ponto de maior temperatura para um ponto de menor temperatura. Quanto maior esta diferença, maior o calor extraído por unidade de tempo. A temperatura do molde e do material são parâmetros de entrada para a simulação de injeção. Verificou-se, em um modelo hipotético, a influência deste parâmetro no tempo de congelamento do produto.

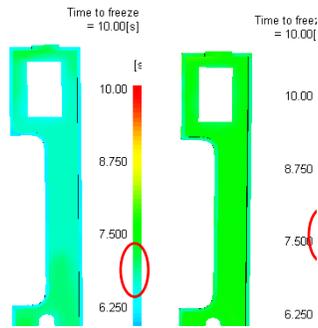


Figura 6 – Influência do ΔT no tempo de congelamento

Em resumo, os tempo de congelamento oscilam por 6,5; 7,5 até 8,5 segundos com molde à temperaturas de 10, 25 e 45° C respectivamente.

3.2 Taxa de Transferência de calor das paredes da cavidade para a superfície interna dos circuitos de refrigeração (através do metal do molde);

Nesta etapa o calor atravessa o metal do molde e chega às paredes internas dos circuitos de refrigeração. Da mesma forma, existem alguns fatores importantes que influenciam diretamente no processo de transferência de calor. São eles:

- As propriedades térmicas, calor específico e condutividade térmica do material do molde;
- A distância entre os canais de refrigeração e a cavidade;
- Gradiente de temperatura entre o fluido refrigerante e a interface Molde x Cavidade.

3.2.1 - Propriedades Térmicas do material do molde

Foi realizada uma simulação do mesmo modelo usado anteriormente, considerando o material do molde em Cobre Berílio e depois em Aço P20. Os resultados obtidos podem ser visualizados na figura abaixo:

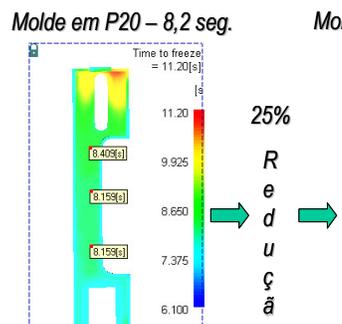


Figura 7 – Material do molde no tempo de congelamento

3.2.2 - A distância entre os canais de refrigeração e a cavidade;

No projeto da refrigeração, o posicionamento dos circuitos é muito importante na definição da performance do sistema. Busca-se com esse posicionamento obter os menores tempos de ciclo e uniformidade de temperaturas ao longo da superfície da cavidade. As figuras abaixo exemplificam a influência do posicionamento dos circuitos na uniformidade de temperaturas.

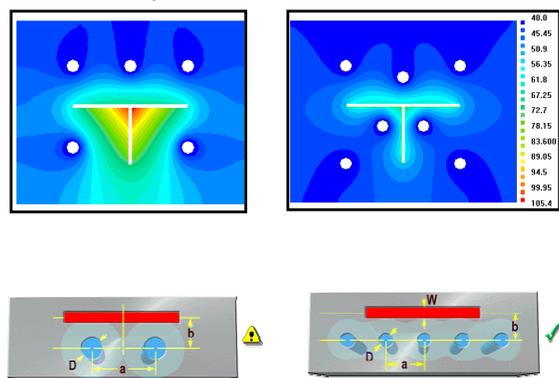


Figura 8 –

O efeito da presença dos cantos no produto apresentado na figura acima e à esquerda provoca uma concentração de calor e um aumento das temperaturas na região. Com a mudança no posicionamento dos circuitos de refrigeração verifica-se uma melhora na distribuição de temperaturas e conseqüente aumento da performance do sistema.

A uniformidade de temperaturas ao longo da peça e entre um lado e outro da mesma permite prevenir o tensionamento interno do produto e o por conseqüência, o empenamento. A figura abaixo exemplifica este efeito :

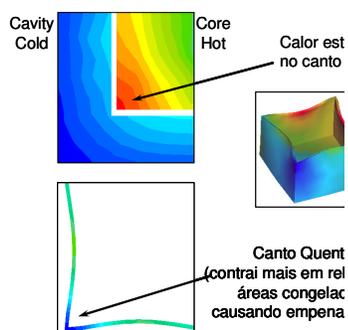


Figura 9 – Empenamento causado por diferenças de temperatura

Para quantificar o impacto da distância dos circuitos à parede do molde no tempo de ciclo realizou-se uma simulação no modelo exemplo avaliando duas condições diferentes. Na figura abaixo avalia-se o resultado da evolução da camada congelada da peça com o tempo. Entende-se por 100% de camada congelada o momento em que todas as camadas ao longo da espessura da peça, no ponto de interesse, estão com a temperatura abaixo da temperatura de extração indicada para o material. O tempo indicado nas figuras abaixo representa então o tempo de congelamento do produto:

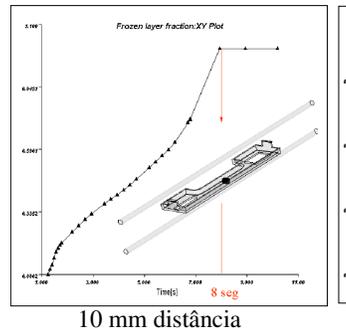


Figura 10 – Impacto da distância dos circuitos no tempo de congelamento

Com o aumento da distância dos circuitos de 10 para 30 mm, ocorreu uma redução na performance deste circuito de aproximadamente 40%, o que comprometeria então o tempo de ciclo esperado para a fabricação do produto.

3.3 Transferência de calor da superfície do circuito para o fluido refrigerante (através do fluido de refrigeração)

Na última parte do seu percurso o calor é levado das paredes do circuito de refrigeração para o fluido refrigerante e então para fora do molde. Existem alguns fatores importantes nesta fase, sendo eles :

- O número de Reynolds imposto ao fluido e conseqüentemente, sua vazão e perda de carga;
- A configuração em série ou paralelo definida para o arranjo dos circuitos no molde.

O número de Reynolds corresponde a um valor adimensional que leva em consideração a densidade do fluido refrigerante, a velocidade do fluido no circuito, o diâmetro do circuito de refrigeração e por fim, a viscosidade cinemática do fluido. Este número representa uma medida do nível de turbulência que existe no escoamento. Quaisquer alterações em projeto que provoquem mudanças nestes parâmetros alteram o número de Reynolds, a turbulência e a eficiência de extração de calor.

Para números de Reynolds menor que 2300 dizemos que o escoamento é Laminar. Nesta condição, a condução de calor é realizada exclusivamente por condução. Com valores em torno de 2300 e 4600 temos a fase de transição e, para valores acima de 4600 o escoamento alcança o regime de fluxo turbulento. O Fluxo turbulento por sua vez, melhora a troca de calor pois a mesma passa a ocorrer por convecção. A figura abaixo exemplifica as diferenças de performance nas duas situações:

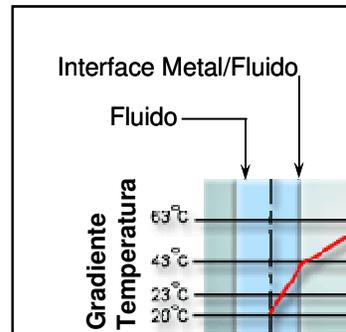


Figura 11 – Influência do regime de fluxo no escoamento

3.3.1 - Vazão, perda de carga e configuração do circuito

Garantir fluxo turbulento é a premissa básica para permitir uma troca de calor mais eficiente pelo fluido de refrigeração. Para isso o principal parâmetro a ser controlado é a vazão. Maiores vazões traduzem maiores velocidades do líquido no circuito e maiores números de Reynolds.

Com o aumento da vazão aumenta-se também a perda de carga e a pressão necessária para garantir o escoamento do fluido pelo circuito. Por “perda de carga” entende-se a energia gasta pelo fluido ao escoar. Quanto maior esta perda, maiores as pressões necessárias e mais robustos devem ser os equipamentos no “chão de fábrica” como *torres de refrigeração* ou *geladeiras*. Para adequar o projeto da refrigeração do molde às condições de vazão e pressão disponíveis, deve-se cuidar para definir bem a configuração dos circuitos do molde, considerando ligações em paralelo e em série conforme a situação:

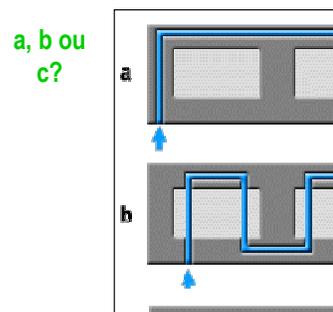


Figura 12 – Configurações em série e paralelo

Como regra, para verificar a eficácia de um circuito de refrigeração, deve ser observado um aumento de temperatura máximo de 5° C entre a entrada e saída do fluido.

Em um circuito, a perda de carga e a pressão necessária para garantir a vazão é diretamente proporcional ao seu comprimento. As ligações em série nos circuitos de refrigeração devem ser contempladas quando as pressões, que garantam vazões mínimas para um fluxo turbulento, estejam abaixo dos valores disponíveis nos equipamentos de refrigeração.

Nas ligações em paralelo, a vazão disponível é dividida, proporcional à perda de carga imposta por cada ramo de circuito. Diferente da ligação em série, a maior limitação passa ser diretamente a vazão no circuito, já que a pressão para garanti-la é menor.

4 CONCLUSÕES

- A eficiência de um sistema de refrigeração desenhado para um molde de injeção é dependente de diversos fatores. Para que haja sinergia e os resultados sejam os desejados, durante o projeto deve ser avaliado não somente os materiais utilizados no molde e posicionamento de circuitos mas também o projeto do produto plástico em si.
- A escolha da configuração dos canais de refrigeração em série ou paralelo é dependente da disponibilidade de vazão e pressão no chão de fábrica e não são soluções de projeto excludentes. Ambas podem ser combinadas para se alcançar a melhor solução de projeto.
- A espessura do produto foi o fator que mostrou maior influência no tempo de ciclo e/ou congelamento do produto. A baixa condutividade térmica do material termoplástico associada ao aumento da espessura torna exponencial a queda da eficácia de troca de calor no molde.
- Além da produtividade, problemas de qualidade dos produtos plásticos injetados estão diretamente associados ao projeto do molde e do produto como um todo. O uso da engenharia simultânea se mostra cada vez mais necessário e a simulação de injeção deve ser utilizada como ferramenta de suporte a este processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **Moldflow Plastics Insight 4.1 - On Line Help**. Wayland, MA: 2003.
- [2] **Advanced Flow Moldflow Simulation Training Manual**. Wayland, MA: 2003.
- [3] **Advanced Cool Moldflow Simulation Training Manual**. Wayland, MA: 2003.
- [4] FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; Introdução à Mecânica dos Fluidos. Rio de Janeiro : Editora Guanabara, 1988.
- [4] INCROPERA, Frank P.; WITT, David P. de; Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. Rio de Janeiro : Editora Guanabara, 1992.

¹ HOW A MOLD COOLING SYSTEM DESIGN CAN INFLUENCE IN THE INJECTION MOLDING PERFORMANCE

(II) Mário Sonsino Carneiro

ABSTRACT

The main objective of this paper is present how different factors in a mold cooling system design can influence quality and productivity injection molding performances. The approach in this paper consider a heat transfer process in a injection mold and its different steps as below :

- Heat flux through Melt (Part thickness);
- Heat flux through the mold metal;
- Heat flux through the coolant used to cool the mold.

The several Mold and product design parameters are classified looking at importance to mold performance. They are quantified using injection molding simulation with Moldflow. We intend to conclude about which parameters are really important and how to optimize them using the injection molding simulation as a main tool.

Key Words: Cooling system, moldflow, injection molding

⁽¹⁾ 2º Encontro da Cadeira de Ferramentas, Moldes e Matrizes - 21 a 23 de setembro de 2004 ABM – São Paulo - SP

^(II) Mário S. Carneiro ; Gerente de Produto ; Smarttech Serviços e Sistemas Ltda