

INFLUÊNCIA DA DISPOSIÇÃO DE CANAIS DE REFRIGERAÇÃO DE MOLDES DE INJEÇÃO SOBRE O AVANÇO DE FRONTEIRA DE SOLIDIFICAÇÃO DE POLÍMEROS

Gleison Renan Inácio, gleisonrenan@gmail.com¹

Diego Luidy Beppler, diegobeppler@gmail.com¹

Paulo Sérgio Berving Zdanski, paulo.zdanski@udesc.br¹

Miguel Vaz Júnior, miguel.vaz@udesc.br¹

¹Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, Campus Universitário Prof. Avelino Marcante - Rua Paulo Malschitzki, 200 - Zona Industrial Norte, Joinville - SC, 89219-710

Resumo: A etapa de refrigeração do molde e solidificação do polímero injetado representa a maior parte do tempo do processo produtivo de injeção de peças poliméricas na indústria de transformados de plásticos. Com o propósito de determinar os parâmetros que influenciam positivamente nesta etapa de resfriamento, o efeito das características do sistema de refrigeração de um molde sobre a distribuição de temperaturas no interior do mesmo, combinada com o processo de solidificação do polímero, foi avaliado utilizando-se o software ANSYS Fluent. Para tal, realizou-se uma análise transiente da transferência de calor que ocorre durante a refrigeração de um molde e do avanço da fronteira de solidificação do polímero. Ao avaliar diferentes posições para os canais de refrigeração, identificou-se a grande influência deste parâmetro perante os gradientes de temperatura no molde e no polímero e que o arranjo de canais de refrigeração que desempenha o menor tempo de refrigeração não é o mesmo que proporciona a melhor distribuição de temperaturas no meio.

Palavras-chave: Fronteira de solidificação, injeção de polímeros, simulação numérica.

1. INTRODUÇÃO

O processo de injeção é um processo cíclico, composto de três principais estágios: preenchimento do molde, refrigeração do polímero e ejeção da peça. Afirma-se a grande importância da etapa de refrigeração, visto que a qualidade do produto final está fortemente relacionada à etapa de resfriamento bem como ao fato de mais de 70% do tempo do ciclo dever-se ao resfriamento, influenciando diretamente a produtividade (Hassan, 2009).

Ao tratar do sistema de refrigeração de um processo de injeção devem-se analisar os parâmetros mais relevantes para o seu funcionamento, entre eles: tamanho, posição e arranjo dos canais de refrigeração, bem como as propriedades térmicas, temperatura e fluxo do líquido refrigerante empregado (Qiao, 2006). Devido ao grande número de parâmetros a serem avaliados, o processo de melhoria dos processos estudados apresenta-se extremamente difícil. Tradicionalmente o projeto de processos de injeção baseia-se na experiência e intuição do projetista, entretanto, com o aumento na complexidade dos projetos de injeção, o projeto manual torna-se inadequado, ou até mesmo impossível (Tang, 1997).

Recorre-se então aos métodos de simulação numérica, pois estes permitem estudar profundamente os detalhes do processo, em uma maneira na qual a metodologia experimental não permitiria. Logo, a simulação numérica reduz custos e entrega melhores resultados (Whelan A.; Craft, 1986).

Em referência à relevância do assunto, fez-se uma análise do efeito das características do sistema de refrigeração sobre a distribuição de temperaturas no molde e no polímero nele inserido, permitindo avaliar seu efeito também na solidificação do polímero. Para tal, realizou-se uma análise transiente da transferência de calor que ocorre durante a refrigeração de um molde, utilizando o software comercial ANSYS Fluent, incluindo a análise de mudança de fase líquido-sólido do polímero injetado. Outros esforços na análise do comportamento do processo de injeção e solidificação de polímeros foram importantes para delinear a abordagem realizada aqui.

Hassan (2009) efetuou um estudo bidimensional transiente focado na análise da solidificação de uma peça de polímero. O método escolhido para modelar a solidificação é o método de porosidade-entalpia, (Voller; Prakash, 1987). Foram avaliados os efeitos da seção transversal dos canais de refrigeração bem como do posicionamento dos mesmos, sobre a distribuição de temperaturas e sobre o tempo de solidificação da peça. Os resultados indicam uma pequena influência da seção do canal sobre os parâmetros avaliados e uma grande dependência em relação ao posicionamento destes canais. Avalia-se também que o posicionamento que proporciona o menor tempo de solidificação não é o mesmo que atinge uma distribuição ótima de temperatura ao longo da peça.

Zdanski e Vaz Jr. (2009) discutem neste estudo os aspectos físicos do fluxo de um polímero fundido em expansões súbitas. Utilizando o método de diferenças finitas para discretizar as equações de governo, o estudo avaliou a influência da razão de expansão e da temperatura de injeção do polímero sobre os parâmetros do escoamento, como: campo de velocidades, queda de pressão e distribuição da viscosidade. O estudo conclui confirmando a relação próxima entre

temperaturas de injeção e nas paredes, espessura do canal de ataque e queda de pressão, fato que evidencia a importância de uma abordagem não isotérmica da reologia do material.

Por meio da utilização do software comercial Autodesk Moldflow, Kovacs e Siklo (2011) desenvolveram um estudo tridimensional da solidificação de uma peça polimérica, visando avaliar os efeitos de encolhimento nas extremidades do molde. Foi identificada uma discrepância entre as temperaturas superficiais das partes superior e inferior do molde. Avaliou-se então uma anisotropia nas deformações induzidas pela refrigeração da peça, causadas por essa assimetria na refrigeração do sistema.

2. MODELO MATEMÁTICO

A partir de uma análise de balanço de energia em um volume de controle diferencial, considerando meios estacionários, obtém-se a equação (1), onde x_i indica as coordenadas das direções, h é a entalpia e ρ , c e k são respectivamente a massa específica, o calor específico e condutividade térmica. Deve-se introduzir o termo fonte S_h em (1), referente à solidificação, para particularizar a equação da energia.

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{k}{c} \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) + S_h \quad (1)$$

Visando modelar o fenômeno da solidificação, apresenta-se como base a formulação de porosidade-entalpia desenvolvida por Voller e Prakash (1987). Nesta formulação introduz-se uma zona porosa, dentro da qual são avaliados os termos fonte associados ao fenômeno da solidificação. A variação da entalpia é dada por:

$$H = h + \Delta H \quad (2)$$

$$\Delta H = \begin{cases} L & , T \geq T_l \\ L(1 - F_s) & , T_l > T \geq T_s \\ 0 & , T < T_s \end{cases} \quad (3)$$

Sendo $h = cT$ o calor sensível, $F_s(T)$ a fração sólida, L o calor latente, T_s e T_l as temperaturas *solidus* e *liquidus*, respectivamente. Reconhece-se, portanto, que a variação de entalpia ΔH , associada ao calor latente, apresenta-se como uma função da temperatura e da fração sólida do material, a qual é definida na equação:

$$F_s(T) = \begin{cases} 0 & , T \geq T_l \\ (T_l - T)/2T_l & , T_l > T \geq T_s \\ 1 & , T < T_s \end{cases} \quad (4)$$

Sendo este um método baseado na porosidade e na entalpia, torna-se necessário definir também a porosidade do meio, λ que assume os valores de $\lambda = 1$ na fase líquida, $\lambda = 0$ na fase sólida e $0 < \lambda < 1$ na *mushy region*, ou região pastosa. O termo de velocidade superficial é então definido por: $u = \lambda u_l$, na qual u_l representa a velocidade real do fluido e definindo a porosidade como $\lambda = 1 - F_s$, pode-se escrever uma expressão geral para a velocidade em todo o domínio estudado.

$$u = \begin{cases} u_l & , T \geq T_l \\ (1 - F_s)u_l & , T_l > T \geq T_s \\ 0 & , T < T_s \end{cases} \quad (5)$$

Pode-se obter o valor de S_h ao inserir na equação da energia (1), a equação (2), obtendo:

$$S_h = \frac{\partial(\rho \Delta H)}{\partial t} = \rho L \frac{\partial F_s}{\partial t} \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{k}{c} \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) + \rho L \frac{\partial F_s}{\partial t} \quad (7)$$

2.1. Desenvolvimento analítico

A validação do software utilizado é feita em relação à solução analítica do caso de um domínio semi-infinito, apresentado na Fig. (1) que inicialmente encontra-se todo no estado líquido a uma temperatura T_0 superior àquela T_F de solidificação. Submete-se então a superfície $x = 0$ a uma temperatura menor que T_F .

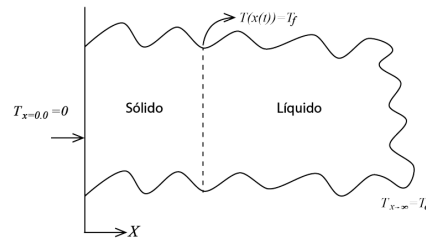


Figura 1. Domínio Semi-infinito

Aplicando a equação da energia a cada uma das fases presentes no domínio, tem-se:

$$\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial T_s}{\partial t}, \quad \text{e} \quad \frac{\partial^2 T_l}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_l} \frac{\partial T_l}{\partial t}. \quad (8)$$

Nas quais α_s e α_l são as difusividades térmicas dos dois estados, definidas como:

$$\alpha_s = \frac{K_s}{\rho_s c_s}, \quad \alpha_l = \frac{K_l}{\rho_l c_l} \quad (9)$$

As condições de contorno do problema são:

$$T_s(x = 0, t) = 0, \quad (10)$$

$$T_s(x = x(t), t) = T_l(x = x(t), t) = T_f - T_{x=0} = T_f, \quad (11)$$

$$T_l(x \rightarrow \infty, t) = T_0 - T_{x=0} = T_0, \quad \text{e} \quad (12)$$

$$T_l(x, t = 0) = T_0. \quad (13)$$

Através da solução das equações diferenciais apresentadas, para as condições de contorno indicadas, é possível obter a distribuição de temperaturas em ambos os meios.

$$T_s(x, t) = \frac{T_f}{\text{erf} \xi} \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_s t}} \right), \quad (14)$$

$$T_s(x, t) = T_0 - \frac{T_0 - T_f}{\text{erf} \xi \sqrt{\frac{\alpha_s}{\alpha_l}}} \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_l t}} \right), \quad (15)$$

Ao equivar essas equações pode-se obter uma expressão para a posição da interface entre as duas fases do material estudado. Tal expressão deve ser válida para todos os instantes de tempo, sendo possível somente se $x(t)$ for proporcional a $\sqrt{t}$. Então, pode-se escrever que:

$$x(t) = 2\xi\sqrt{\alpha_s t}, \quad (16)$$

Na qual $x(t)$ é a posição da interface sólido-líquido, e ξ é a expressão adimensional que satisfaz a seguinte equação transcendental:

$$\frac{L\sqrt{\pi}}{c_{ps}T_f} \xi = \frac{e^{-\xi^2}}{\text{erf} \xi} - \frac{K_l}{K_s} \sqrt{\frac{\alpha_s}{\alpha_l}} \frac{T_0 - T_f}{T_f} \frac{e^{-\frac{\alpha_s \xi^2}{\alpha_l}}}{\text{erfc} \left(\xi \sqrt{\frac{\alpha_s}{\alpha_l}} \right)}, \quad (17)$$

3. MODELO NUMÉRICO

O software escolhido para a realização deste trabalho, ANSYS Fluent, utiliza o método dos volumes finitos para a solução da simulação numérica. O Método dos Volumes Finitos, conforme afirma Hirsch (2009), apresenta-se atualmente como a metodologia mais difundida para aplicações em CFD, visto que seus atrativos incluem sua generalidade, sua simplicidade conceitual e sua facilidade de implantação para malhas arbitrarias. Neste estudo o domínio foi considerado bidimensional com uma malha composta de quadriláteros visando facilitar o procedimento numérico.

No tratamento da simulação numérica, selecionam-se quais modelos serão simulados e quais métodos serão utilizados pelo software selecionado. São ativados dois deles: Energia, que habilita a resolução da equação da energia e Solidificação e Derretimento, o qual modela a solidificação ao adicionar termos fonte nas equações de conservação.

O programa ANSYS Fluent aplica o método de Volumes Finitos, avaliando as equações numericamente por meio do método de Gauss-Seidel. Para a definição da discretização o método de Green-Gauss, baseado nos nós dos elementos, foi definido para avaliar o gradiente dos termos difusivos. Para avaliação do balanço de energia utilizou-se aproximação de segunda ordem *upwind*. Na avaliação do passo de tempo foi utilizada uma discretização temporal implícita de segunda ordem.

3.1 Validação

A validação da utilização do software, bem como o domínio do fenômeno da solidificação, foi realizada comparando a simulação da solidificação transiente de um meio semi-infinito com a resolução analítica (item 2.1), realizado por Hassan, Regnier e Defaye (2009), com parâmetros em conformidade com a referência adotada.

Uma vez que a metodologia numérica trabalha com uma zona porosa na interface líquido-sólido, deve-se definir a interface a ser monitorada no tempo. Para tal, foi criada uma iso-superfície que contivesse as regiões dentro da qual a fração de sólido estivesse entre 0.99 e 1.00. Pode-se então, utilizando a coordenada desta superfície, construir a curva de avanço de fronteira para a comparação dos resultados.

Uma comparação entre o avanço de fronteira descrita pela equação analítica e aquela obtida numericamente é mostrada na Fig. (2). Pode-se observar uma boa concordância entre o resultado numérico e a expressão analítica, validando então a utilização do *software* escolhido.

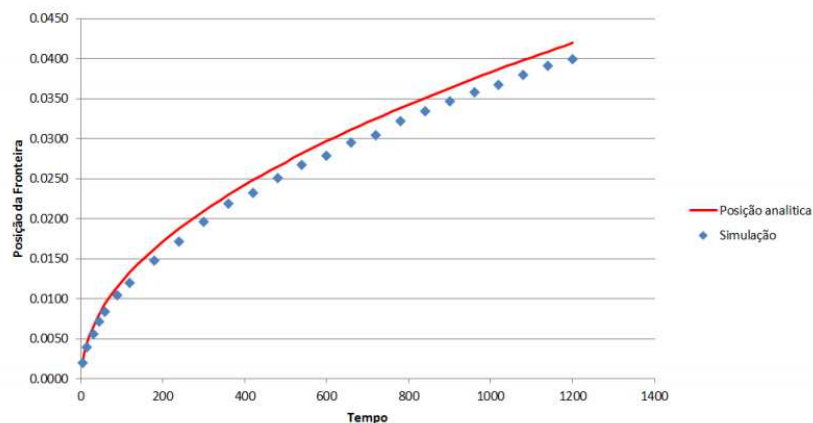


Figura 2. Comparação Avanço Fronteira

4. ANÁLISE NUMÉRICA

Para avaliação da relação do processo de solidificação com a disposição de canais de refrigeração de moldes de injeção adotou-se a geometria da Fig. (3) para geração de malha e na análise numérica.

As dimensões da geometria estudada são $H = 75mm$; $L = 150mm$; $h = 2mm$; $l = 60mm$; $r = 4mm$ e $R = 6mm$. As coordenadas dos canais de refrigeração são indicadas por (x_t, y_t) para aquelas do topo do molde e (x_b, y_b) para aquelas da parte inferior. Para os estudos de malha e passo de tempo foi utilizada a seguinte posição de referência para os canais de refrigeração: $(x_t, y_t) = (50mm, 90mm)$ e $(x_b, y_b) = (50mm, 60mm)$.

O polímero avaliado possui propriedades conforme Tab. (1). Para as arestas externas, bem como aquelas associadas à refrigeração, seleciona-se a condição de parede convectiva. As arestas de contato entre o molde e o polímero ficam definidas como termicamente acopladas e a parede interna indica-se como uma simetria. Os parâmetros referentes a elas são indicados na Tab. (2).

Um estudo de refinamento de malha e otimização de avanço de tempo determinou valores padrão de 0.5 mm para o tamanho da malha e um passo de tempo de 0.5s, mantendo uma boa convergência sem prejudicar o custo computacional.

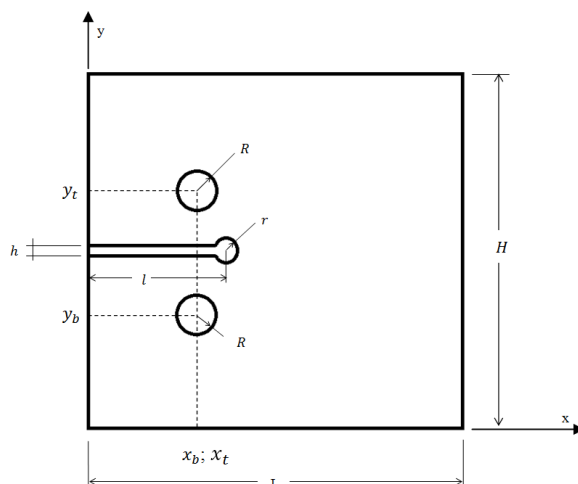


Figura 3. Esboço Geometria

Tabela 1. Propriedades

Material	Densidade [kg/m^3]	Calor Específico [J/kgK]	Condutividade [W/mK]
Molde	7670	426	36.5
Polímero	938	1800	0.25

Tabela 2. Parâmetros de operação

Temperatura Fluido Refrigerante	30 °C	Temperatura Ambiente	30 °C
Temperatura Polímero Injetado	220 °C	Coefficiente Troca Convecção Natural	77 $Wm^{-2}K^{-1}$
Temperatura Fusão Polímero	110 °C	Coefficiente Troca Convecção Forçada	3650 $Wm^{-2}K^{-1}$
Calor Latente	115 $kJkg^{-1}$	Temperatura inicial do Molde	50 °C

5. RESULTADOS

Para as condições de referência previamente determinadas $((x_t, y_t) = (50mm, 90mm)$ e $(x_b, y_b) = (50mm, 60mm))$, foi realizada uma simulação transiente de 30s. Apresenta-se na Fig. (4) a evolução dos perfis de temperatura no molde metálico.

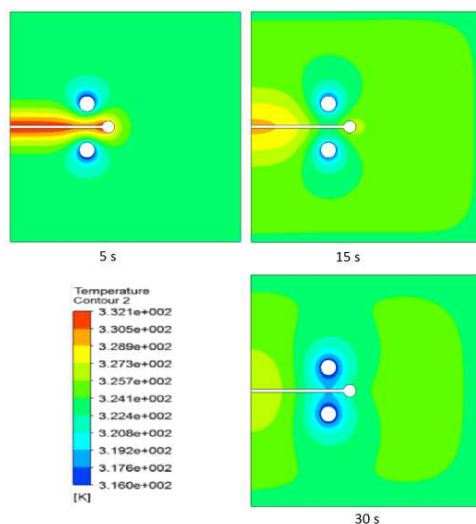


Figura 4. Temperaturas no Molde

Pode-se observar o efeito do calor fornecido pelo polímero ao molde nas fronteiras do mesmo, causando o aumento da temperatura nessas regiões. Observa-se ademais, nas regiões próximas aos canais de refrigeração, o efeito da remoção de calor causada pelo fluxo do fluido refrigerante, reduzindo as temperaturas no molde e possibilitando a solidificação.

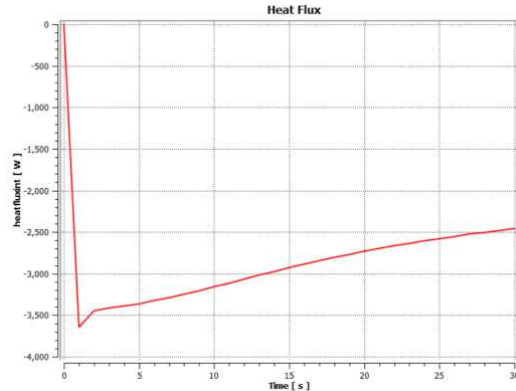


Figura 5. Fluxo de Calor – Canais de Refrigeração

Os fluxos de calor nas condições de contorno são apresentados na Fig. (5). Os fluxos de calor predominantes são aqueles referentes aos canais de refrigeração internos, que atingem um valor máximo de 3600 W, e decaem ao longo do tempo, visto que a diferença entre a temperatura do molde e a temperatura do fluido refrigerante diminui.

5.1 Posição dos Canais de Refrigeração

Para avaliar o efeito da posição dos canais de refrigeração elaborou-se um *grid* com as posições a serem simuladas. A Fig.(6) apresenta a distribuição destes pontos. Os pontos foram distribuídos linearmente e radialmente, com respeito ao círculo da geometria polimérica.

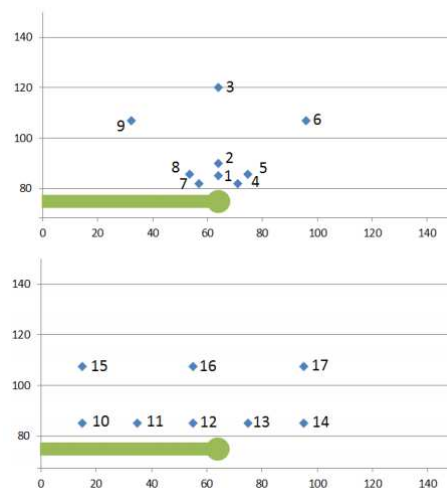


Figura 6. Posição dos Canais

Os critérios a serem avaliados, ao longo do tempo, em cada uma destas posições foram: fração de líquido no domínio polimérico e o funcional de temperatura definido por Qiao (2006):

$$f(x) = \sqrt{\frac{1}{S} \int_S (T(x) - \bar{T}(x))^2}, \quad (18)$$

representando a diferença entre as temperaturas na cavidade do molde. Este funcional é avaliado somente no domínio polimérico e utilizado no intuito de reduzir tal propriedade. Definem-se como: S a área do domínio polimérico, T a temperatura e $\bar{T}$ a temperatura média no domínio.

A Fig. (7) representa a resposta do sistema ao posicionamento dos canais de refrigeração, compilando as frações de líquido no meio polimérico nos últimos 10s da simulação para as configurações avaliadas. Ou seja, para cada uma das

posições avaliadas do canal de refrigeração (de 1 a 14), ao final de 10s, a fração de líquido presente no canal de injeção foi avaliada, identificando uma superfície de resposta.

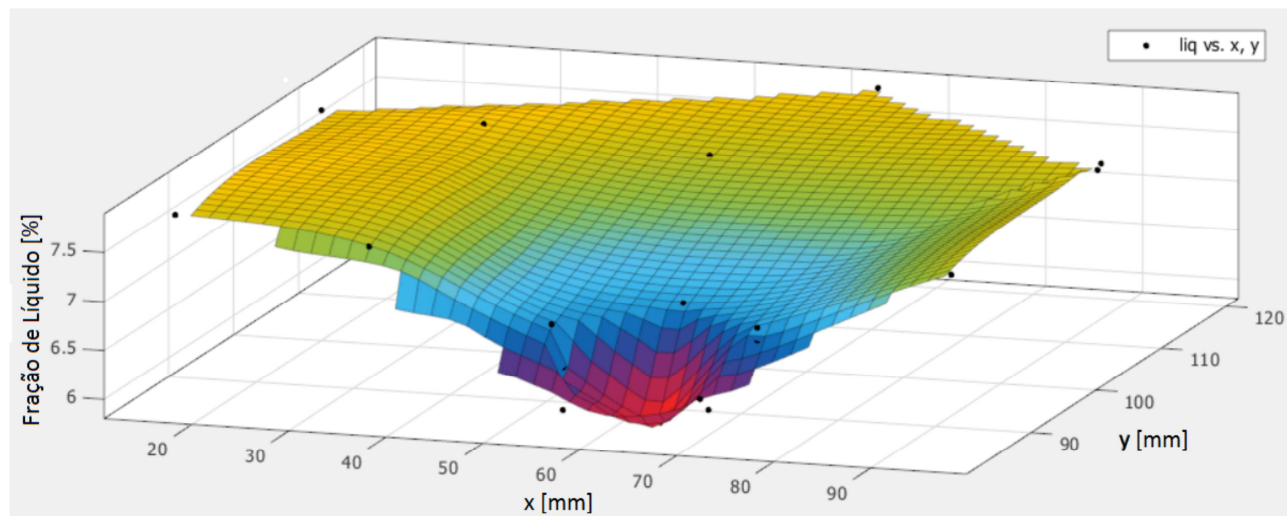


Figura 7. Superfície de Resposta Relativa à Fração de Líquido em 10s e Posicionamento do Canal de Refrigeração

Os canais com melhor resultado, relativo ao tempo de solidificação, são aqueles mais próximos do círculo na geometria estudada, ou ainda, mais próximos à depressão da superfície de resposta da Fig. (7). Tal fenômeno associa-se ao fato do círculo possuir a maior concentração de energia a ser dissipada, e a proximidade do canal de refrigeração leva a uma aceleração desse processo. Para os canais mais distantes o fenômeno é retardado, pois o gradiente de temperaturas próximo ao polímero tem menor intensidade.

Os resultados obtidos referentes ao funcional de temperatura são observados na Fig. (8). Analisando dois parâmetros das coordenadas pode-se analisar o comportamento do funcional em relação à posição do canal.

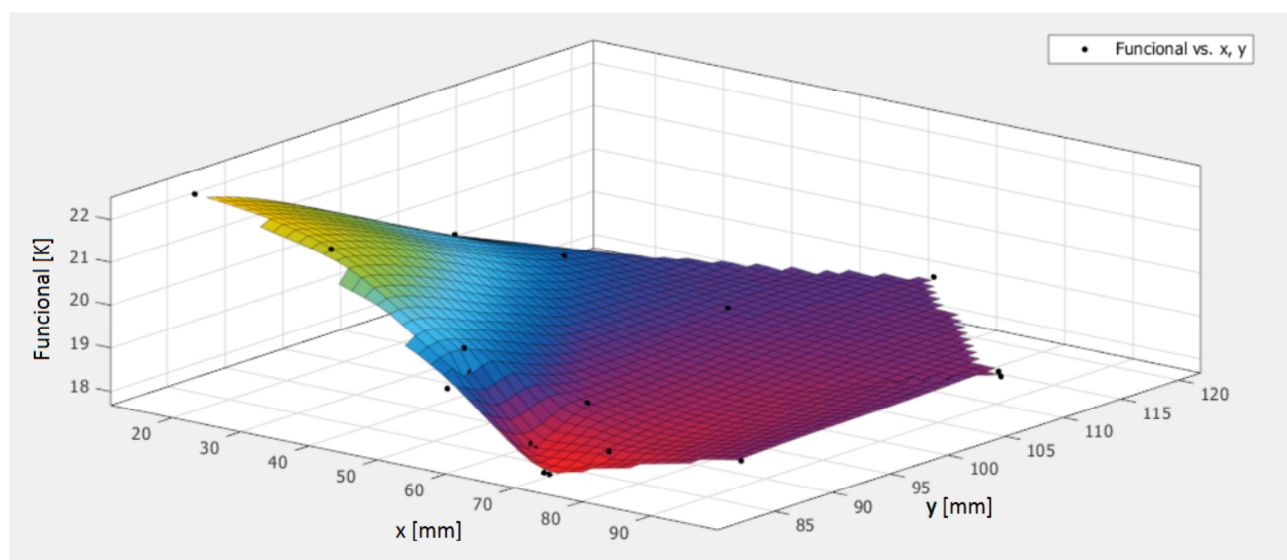


Figura 8. Superfície de Resposta relativa ao Funcional de Temperatura e Posição do Canal de Refrigeração

Analisando a distância radial entre a peça e os canais de refrigeração, pode-se observar que um canal de refrigeração mais próximo do polímero, terá uma distribuição mais uniforme de temperaturas, ao passo que os canais distantes tendem a aumentar os gradientes de temperatura. Ao analisar o impacto da posição horizontal dos canais, pode-se observar que os canais posicionados a direita do polímero geraram distribuições mais uniformes que aquelas à esquerda. Tal resultado é possível, pois a refrigeração, ao atuar mais intensamente sobre o círculo da peça, faz com que essas duas regiões tenham uma taxa de solidificação mais semelhante.

6 CONCLUSÕES

Ao avaliar diferentes posições para os canais de refrigeração, pôde-se detectar a grande influência deste parâmetro perante os gradientes de temperatura no molde e no polímero. Ademais, identificou-se que ao aproximar tais canais à concentração de massa da geometria estudada reduziu-se o tempo necessário para a solidificação do produto. Tratando do funcional de temperatura, observou-se que canais mais distantes da seção reta e próximas da concentração de massa geram melhores resultados.

Pode-se então concluir que o arranjo de canais de refrigeração que desempenha o menor tempo de refrigeração não é o mesmo que proporciona a melhor distribuição de temperaturas no meio.

Visando trabalhos futuros, sugere-se a expansão deste estudo para um domínio tridimensional que possibilitaria muitos avanços e maior aplicabilidade na indústria.

7 REFERÊNCIAS

- Hassan, H., Regnier, N., Defaye, G. A 3d study on the effect of gate location on the cooling of polymer by injection molding. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, v. 30, p. 1218–1229, 2009.
- Hassan, H. e. a. Effect of cooling system on the polymer temperature and solidification during injection molding. *Applied Thermal Engineering*, v. 29, p.1786–1791, 2009.
- Hirsch, C. Numerical Computation of internal and external flows. Butterworth-Heinemann, 2009.
- Kovacs, J. G.; Siklo, B. Investigation of cooling effect at corners in injection molding. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, v. 38, p.1330–1334, 2011.
- Qiao, H. A systems computer-aided approach to cooling system optimal design in plastic injection molding. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 48, p.430–439, 2006.
- Tang, L. Q. Optimal cooling system design for multi-cavity injection molding. *Finite Elements in Analysis and Design*, v. 26, p. 229–251, 1997.
- Voller, V. R.; Prakash, C. A fixed grid numerical modelling method for convection-diffusion mushy region phase-change problems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 30, n. 8, p. 1709–1719, 1987.
- Whelan A.; Craft, J. L. Developments in Plastic Technology. London and New York: Elsevier Applied Science Publishers, 1986.
- Zdanski, P. S. B.; Vaz Jr. Non-isothermal polymer melt flow in sudden expansions. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2009.

INFLUENCE OF INJECTION MOLD'S COOLING CHANNEL POSITION ON POLYMER SOLIDIFICATION FRONTIER INCREASING

Gleison Renan Inácio, gleisonrenan@gmail.com¹

Diego Luidy Beppler, diegobeppler@gmail.com¹

Paulo Sérgio Berving Zdanski, paulo.zdanski@udesc.br¹

Miguel Vaz Júnior, miguel.vaz@udesc.br¹

¹Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, Campus Universitário Prof. Avelino Marcante - Rua Paulo Malschitzki, 200 - Zona Industrial Norte, Joinville - SC, 89219-710

Abstract: The mold cooling and polymer solidification step represents the majority of productive process time during injection of polymeric parts on industry. In order to determine the parameters that influence positively in this cooling stage, the effect of the mold cooling system characteristics on the temperatures distribution, combined with the polymer solidification process, was evaluated using the ANSYS Fluent software. Therefore, a transient analysis of the heat transfer occurring during the mold's cooling and the polymer solidification frontier increasing was carried out. Evaluating different positions for the cooling channels, the influence of this parameter on the mold and polymer temperature gradients was identified, as well as the cooling channel arrangement which performs the shortest cooling time is not the same that provides the best temperature distribution.

Keywords: Solidification frontier, polymer injection, numerical analysis.