

OTIMIZAÇÃO DO TEMPO DE REFRIGERAÇÃO DE MOLDES DE INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS

Ricardo Felipe Junckes, ricardojunckes@gmail.com¹

Rafael Fernando Junckes, rafajunckes@gmail.com

Carlos Maurício Sacchelli, Dr., carlos.sacchelli@gmail.com¹

¹ Universidade Federal de Santa Catarina, Rua Dr. João Colin nº2700, Joinville – SC.

Resumo: Atualmente os componentes injetados são utilizados em grande escala nos mais variados produtos, pois alinham inúmeras vantagens. Desta maneira o desenvolvimento de moldes de injeção é necessário, sendo o mesmo composto de vários sistemas. No ciclo do processo de fabricação do componente injetado o tempo de refrigeração é o mais longo, sendo o sistema de refrigeração, o principal responsável. Desta maneira há necessidade de novas pesquisas para reduzir o tempo de produção. O objetivo deste estudo é analisar e propor um sistema de refrigeração com menor tempo de ciclo, por meio de simulações computacionais no software Moldflow®, empregando sistemas de refrigerações em série e sistemas com canais secundários (baffles e bubbler). Os resultados alcançados apresentam a diferença de tempo de ciclo, temperatura e contração da peça para os materiais termoplásticos Polioximetileno(POM), Nylon (PA6), Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) e Polipropileno (PP) muito utilizados na indústria automotiva. Houve otimização no tempo de ciclo utilizando os recursos computacionais. A variação da distância entre os canais de refrigeração em série e o produto, do mesmo modo que a quantidade de canais associados com a distância entre os mesmos, influenciam no tempo de ciclo e temperatura média da peça. Os sistemas de refrigeração secundários diminuíram o tempo de ciclo para três dos quatro materiais avaliados.

Palavras-chave: componentes injetados, moldes de injeção, sistema de refrigeração, simulação computacional.

1. INTRODUÇÃO

A constante busca na redução do consumo de combustível e diminuição de emissões dos veículos faz com que a indústria automotiva invista cada vez mais em pesquisas de novas tecnologias, processos e materiais.

Segundo Szeteioivá (2010) originalmente os plásticos injetados foram indicados porque ofereciam boas propriedades mecânicas combinadas com excelente aparência, incluindo a facilidade de auto coloração. Com isso as aplicações de componentes plásticos na indústria automotiva vêm aumentando nas últimas décadas. O uso de plásticos e materiais compósitos em veículos leves aumentou de menos de 20 libras por veículo em 1960 para 329 libras (cerca de 150 Kg) por carro em 2014. (SWIFT, 2014)

De acordo com Swift (2014), atualmente os materiais plásticos são tipicamente 50% dos materiais utilizados em um veículo de passeio, mas menos de 10% de seu peso, o qual ajuda na produção de carros leves e mais eficientes, resultando em baixas emissões de gases de efeito estufa.

Conforme Harada (2012) a moldagem por injeção é a técnica mais importante para a transformação de produtos plásticos nas mais variadas formas, com uma série de vantagens como elevada reprodutibilidade, geometria complexa e pequenas tolerâncias. Com isso é possível que o produto final seja feito em apenas uma etapa.

Manrich (2013) define que o processo de injeção não é um processo contínuo, mas sim intermitente, seguindo um ciclo conhecido como ciclo de injeção. O ciclo básico de injeção começa quando o molde fecha e dura até o próximo ciclo iniciar, em casos que a retirada da peça não é automática, o tempo de ciclo aumenta adicionando o tempo que o operador leva para retirar a peça da máquina injetora.

Dimla et al. (2015) descreve que o custo-eficiência do processo de injeção é dependente do tempo gasto no ciclo. Correspondentemente, a fase de resfriamento é o mais significativo tempo entre todo o processo, esta fase que determina a taxa a qual as peças são produzidas. Harada (2010) apresenta que o tempo de refrigeração é dependente da espessura da peça injetada, da temperatura do molde e das características do termoplástico.

A refrigeração no ciclo de injeção é a etapa que o material fundido troca calor com as paredes do molde, afim de atingir a temperatura de extração na qual a peça já tem rigidez suficiente para ser extraída do molde, sem sofrer danos estruturais ou superficiais. (HARADA,2012)

Para o aumento da produtividade é desejável ciclos mais curtos. Como o custo operacional por hora de uma máquina é constante, ciclos mais rápidos darão peças de menor custo. (HARADA, 2004)

Como apresentado por Harada (2012) a simulação computacional aplicada na injeção de termoplásticos auxilia desde a concepção do produto, adequando-a para o processo de moldagem por injeção, até a otimização do ciclo de moldagem da peça, minimizando erros de projetos tanto no produto quanto no molde e diminuindo os custos de desenvolvimento de novos produtos. As análises numéricas do processo de injeção permitem elaborar e otimizar a disposição dos canais de injeção e do sistema de refrigeração. Simultaneamente obtendo as condições e parâmetros do processo, como temperatura da peça e do molde, velocidade de injeção, pressão, peso da peça injetada bem como resultados de contração.

Deste modo, a redução no tempo de refrigeração de cada ciclo é de grande importância para aumentar a produtividade de peças injetadas.

O objetivo do estudo é analisar por meio de simulações computacionais no software Moldflow®, sistemas de refrigerações em série e sistemas com canais secundários (*baffles* e *bubbler*), com intuito de obter o menor tempo de ciclo para quatro materiais termoplásticos amplamente utilizados na indústria automotiva.

2. METODOLOGIA

A simulação computacional realizada nesta pesquisa, por meio de auxílio do software Moldflow®, foi a sequência de análise de preenchimento, resfriamento, preenchimento, empacotamento e empenamento (*Fill+Cool+Fill+Pack+Warp*), que permite obter resultados de empenamento e resfriamento da peça. A variação empregada entre as simulações foram:

- Material termoplástico injetado;
- Circuito de refrigeração em série;
- Circuito de refrigeração em série com canais secundários;
- Diâmetro e distância entre os canais;
- Distância entre o canal e a peça;

2.1. Peça para simulação

A peça em estudo utilizada nas simulações trata-se de uma caixa plástica, dividida em nove compartimentos proposta por Berner (2016), com dimensões externas de 130 mm de largura, 110 mm de altura, 20 mm de profundidade e espessura de 2 mm. Na Figura (1) é apresentado o desenho técnico com as respectivas dimensões da peça simulada.

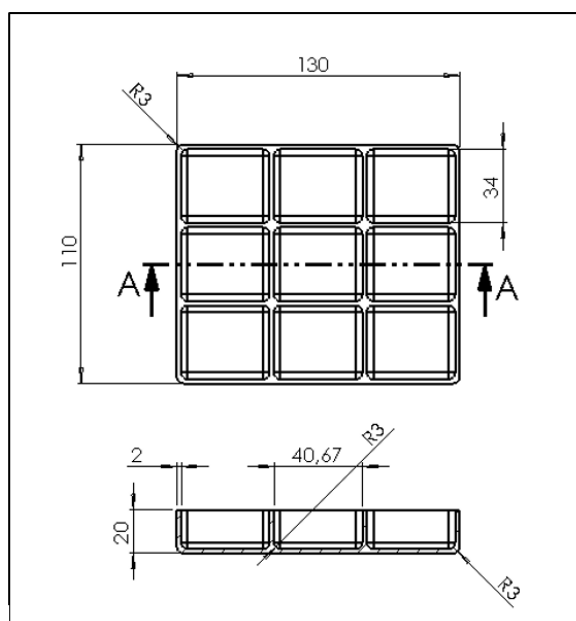


Figura 1. Desenho técnico da peça utilizada.

Fonte: Berner (2016)

O componente foi desenhado em um programa CAD e importado ao Moldflow® em formato STL. Como resultado da criação de malha deste objeto, obteve-se 2989 nós, 5974 elementos triangulares.

2.2. Materiais e parâmetros de processo

Os materiais propostos para análise, foram escolhidos devido à grande aplicação no setor automotivo e por apresentarem diversas propriedades importantes para o ciclo de injeção, estes são descritos na Tab. (1). Os termoplásticos analisados foram o Nylon (PA6) Technyl C216 da Rhodia, o Polioximetileno (POM) Celcom M90 da Ticona, Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) Terluran GP-22 da BASF e o Polipropileno (PP) H105 da Braskem.

Tabela 1. Propriedades físicas e térmicas dos termoplásticos utilizados.

Propriedades	PA 6	POM	ABS	PP
Densidade (g/cm^3)	1,14	1,42	1,04	0,92
Temperatura de ejeção ($^{\circ}C$)	170	130	93	110
Condutividade térmica ($W/m^{\circ}C$)	0,2 a $260^{\circ}C$	0,225 a $220^{\circ}C$	0,16 a $220^{\circ}C$	0,13 a $230^{\circ}C$
Temperatura de Injeção ($^{\circ}C$)	240 a 280	170 a 190	220 a 270	210 a 250
Temperatura do Molde recomendada ($^{\circ}C$)	60	90	50	40
Aparência	Cristalina	Cristalina	Amorfo	Cristalina
Nome comercial	Technyl C216 Natural	Celcon M90	BASF Terluran GP-22	Braskem H105
Calor específico ($J/kg.^{\circ}C$)	2820 a $260^{\circ}C$	2168 a $250^{\circ}C$	2447 a $250^{\circ}C$	2820 a $230^{\circ}C$
Taxa de cisalhamento (1/s)	60000	40000	50000	100000
Tensão de cisalhamento (MPa)	0,5	0,45	0,3	0,25

Fonte: Biblioteca Moldflow® (2013)

Com o objetivo de padronizar as simulações, o tempo de abertura do molde e a porcentagem de material que atingiu a temperatura de ejeção são iguais em todos os casos. Além disso, foi utilizado a mesma temperatura de injeção do molde para os materiais ABS e PP afim de comparar o processo de injeção com o mínimo de mudanças no processo. Para o caso dos materiais PA6 e POM foram empregados valores médios de temperatura de injeção recomendadas na biblioteca do software *MoldFlow*®, o que permite um bom preenchimento do molde sem comprometer as propriedades dos materiais. Os parâmetros de entrada de cada um dos materiais necessários para a análise no software são descritos na Tab. (2).

Tabela 2 - Parâmetros de entrada da simulação.

Condições da análise	PA 6	POM	ABS	PP
Temperatura de Ejeção ($^{\circ}C$)	170	130	93	110
Temperatura de Injeção ($^{\circ}C$)	260	180	230	230
Temperatura do Molde ($^{\circ}C$)	60	90	40	40
Tempo de abertura do molde (s)	5	5	5	5
Porcentagem que atingiu a temperatura de ejeção (%)	95	95	95	95

Fonte: Biblioteca Moldflow® (2013)

2.3. Definição do sistema de refrigeração

No estudo realizado por Berner (2016), as proposições dos sistemas de refrigeração serão em série, onde o fluido deve percorrer um caminho único do começo ao fim do circuito, tendo velocidade e vazão constante ao longo do canal. O estudo analisou a variação do diâmetro do canal, distância entre eles e profundidade do canal em relação a cavidade no molde da peça, de acordo com a Fig. (2) conforme proposto por Berner (2016).

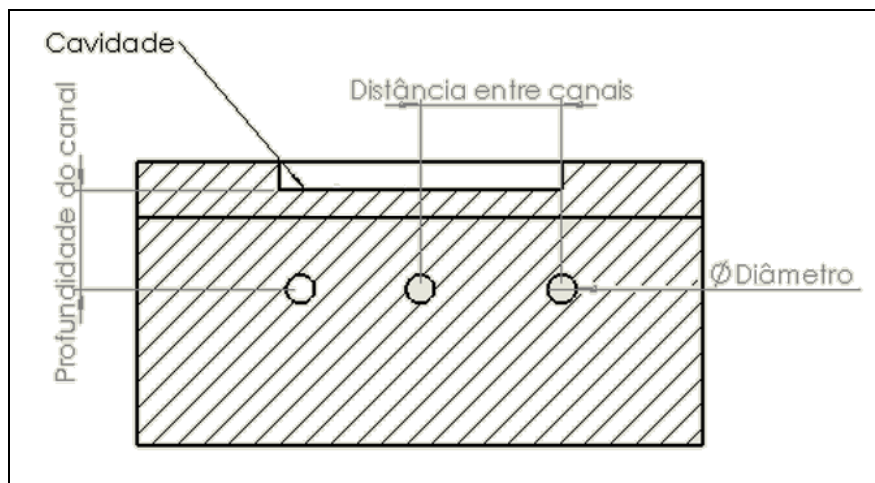


Figura 2 – Parâmetros propostos para variação do sistema de refrigeração.

Fonte: Berner (2016, p.47).

Os diâmetros simulados foram 10 mm e 8 mm e as distâncias entre os canais e a profundidade do canal foram baseadas no diâmetro do canal de refrigeração. Logo, as profundidades constituíram em 3, 2 e 1 vez o diâmetro, e as distâncias entre os canais em 2.5, 5 e 8 vezes o diâmetro. A Tabela (3) exibem as dimensões variadas no estudo.

Tabela 3 – Dimensões para variação do estudo.

Diâmetro (mm)	Entre canais (mm)	Quantidade de canais	Profundidade (mm)
D	2,5 D	8	3 D
			2 D
			1 D
	5 D	4	3 D
			2 D
			1 D
	8 D	2	3 D
			2 D
			1 D

Fonte: Adaptado de Berner (2016).

Os parâmetros foram simulados para os materiais PA6 e POM e então analisados com as simulações efetuadas por Berner (2016) para os materiais ABS e PP, afim de verificar a configuração mais apropriada para a refrigeração.

Em seguida, para diminuir ainda mais o tempo de ciclo, foi realizada simulações com sistemas de refrigeração secundários nas cavidades, sistema com placa defletora também conhecida por *baffles* e sistema borbulhante ou *bubbler*, a peça tem 9 cavidades e geram variações de temperatura elevada entre a superfície interna e externa do componente.

Centimfe (2003) descreve que o sistema bubbler consiste fundamentalmente na introdução de um tubo no interior de um furo, realizado na cavidade por onde entra o fluido de refrigeração, que depois escoam pelas paredes retornando por um canal de saída conforme apresentado na Fig. (3). Além disso, o autor descreve o sistema *baffles*, onde neste tipo de circuito é realizado um furo na posição da cavidade onde se deseja maior troca térmica, com a montagem de uma lâmina separadora perpendicular ao sistema de canal principal afim de obstruir a passagem do fluido, obrigando-o a descer por um lado entre a lâmina e o furo e subir pelo outro lado. A Figura (3) exhibe também o sistema *baffles*.

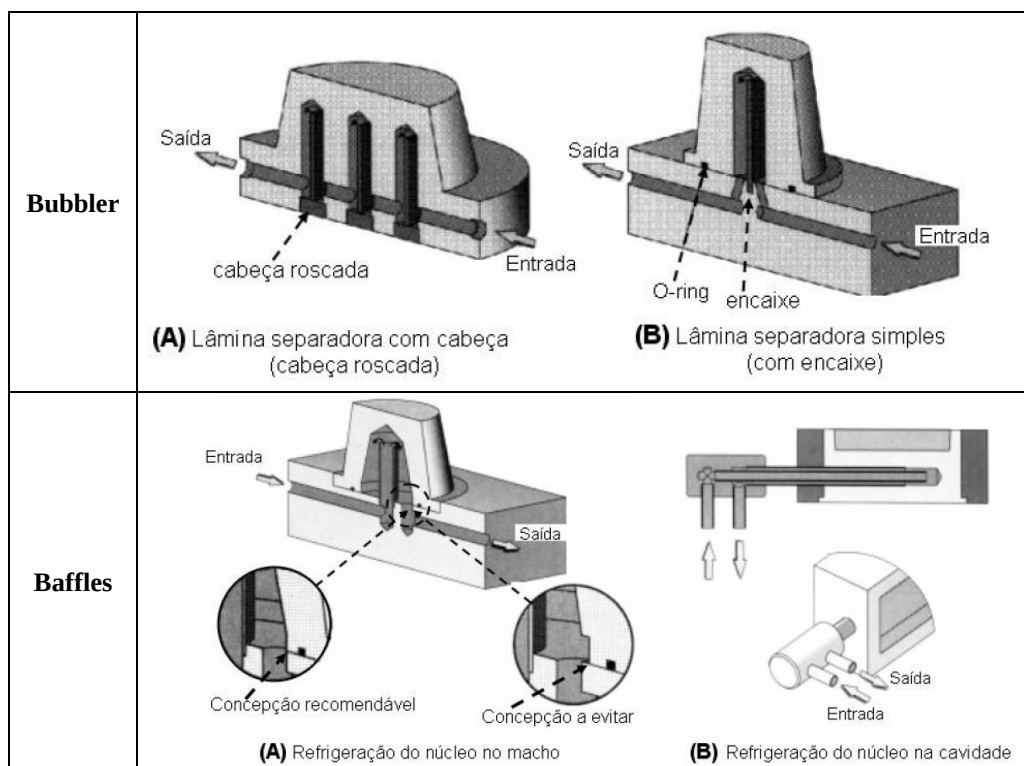


Figura 3 – Exemplo de sistemas de refrigeração secundários.

Fonte: Centimfe, (2003)

As propostas para as análises com sistemas baffle e bubbler foram realizadas a partir dos melhores resultados de sistemas de refrigeração em série, com posicionamento centralizado nas cavidades para que a refrigeração seja homogênea. A área do furo para os canais secundários é duas vezes o do sistema primário, assim a vazão permanece constante em todo o sistema. A profundidade foi avaliada para identificar sua relevância, com análises de 15 mm e 18 mm de profundidade.

3. RESULTADOS

A Tabela (4) e Tab. (5) demonstram os valores obtidos de tempo de ciclo, temperatura média e porcentagem de contração das simulações realizadas para os materiais PA6 e POM, em negrito é apresentada as melhores configurações em relação ao tempo de ciclo, temperatura média e porcentagem de contração do material.

Tabela 4 – Resultados das simulações para PA6.

Diâmetro (mm)	Entre canais (mm)	Quant. canais	Profundidade (mm)	Tempo de ciclo (s)	Temperatura média (°C)	Contração (%)
10	2,5 D	8	1 D	23,1	63,2	5,6
			2 D	26,8	66,6	5,7
			3 D	31,3	66,9	5,8
	5 D	4	1 D	26,5	66,4	5,8
			2 D	31,1	66,9	5,9
			3 D	36,4	66,1	5,9
	8 D	2	1 D	34,5	64,9	5,9
			2 D	38,8	65,7	6,0
			3 D	44,1	65,1	5,9

Tabela 4 – Resultados das simulações para PA6. (Continuação).

Diâmetro (mm)	Entre canais (mm)	Quant. canais	Profundidade (mm)	Tempo de ciclo (s)	Temperatura média (°C)	Contração (%)
8	2,5 D	8	1 D	22,0	62,1	5,6
			2 D	25,3	65,3	5,7
			3 D	27,8	67,6	5,7
	5 D	4	1 D	25,3	65,4	5,8
			2 D	29,9	67,2	5,9
			3 D	32,8	66,6	5,8
	8 D	2	1 D	30,3	67,1	6,0
			2 D	36,0	66,1	5,9
			3 D	41,0	65,5	5,9

Tabela 5 – Resultados das simulações para POM.

Diâmetro (mm)	Entre canais (mm)	Quant. canais	Profundidade (mm)	Tempo de ciclo (s)	Temperatura média (°C)	Contração (%)
10	2,5 D	8	1 D	18,6	58,7	5,5
			2 D	19,4	64,0	5,8
			3 D	21,4	66,2	6,0
	5 D	4	1 D	19,2	63,9	6,1
			2 D	21,3	66,1	6,1
			3 D	23,0	67,8	6,2
	8 D	2	1 D	22,1	66,0	6,3
			2 D	23,3	68,4	6,4
			3 D	25,1	70,1	6,5
8	2,5 D	8	1 D	18,6	56,9	5,5
			2 D	18,6	62,4	5,7
			3 D	20,1	65,0	5,8
	5 D	4	1 D	18,6	62,4	5,9
			2 D	20,1	65,0	6,0
			3 D	21,7	66,8	6,1
	8 D	2	1 D	20,9	66,0	6,3
			2 D	22,5	68,0	6,4
			3 D	24,0	69,5	6,4

Para os termoplásticos POM e PA6 os resultados mais satisfatórios foram obtidos nas configurações com 8 canais de refrigeração em série, com diâmetro de 8 mm, distância entre canais de 2.5 D (20 mm) e profundidade de 8 mm. Os menores tempos de ciclo para ABS e PP analisados por Berner (2016) também foram obtidos para esta configuração. Portanto, a Tabela (6) apresenta o tempo de ciclo, temperatura média e contração para os quatro materiais nesta configuração de sistema de refrigeração em série.

Tabela 6 – Resultados com menor tempo de ciclo para os quatro materiais estudados.

Material	Tempo de ciclo (s)	Temperatura média (°C)	Contração (%)
POM	18,6	56,9	5,5
PA6	22,0	62,1	5,6
ABS	51,7	36,7	2,3
PP	51,8	38,1	11,0

A Figura (4) exibe de maneira mais clara a simulação realizada para o material PA6 com o sistema de refrigeração em série de menor tempo de ciclo.

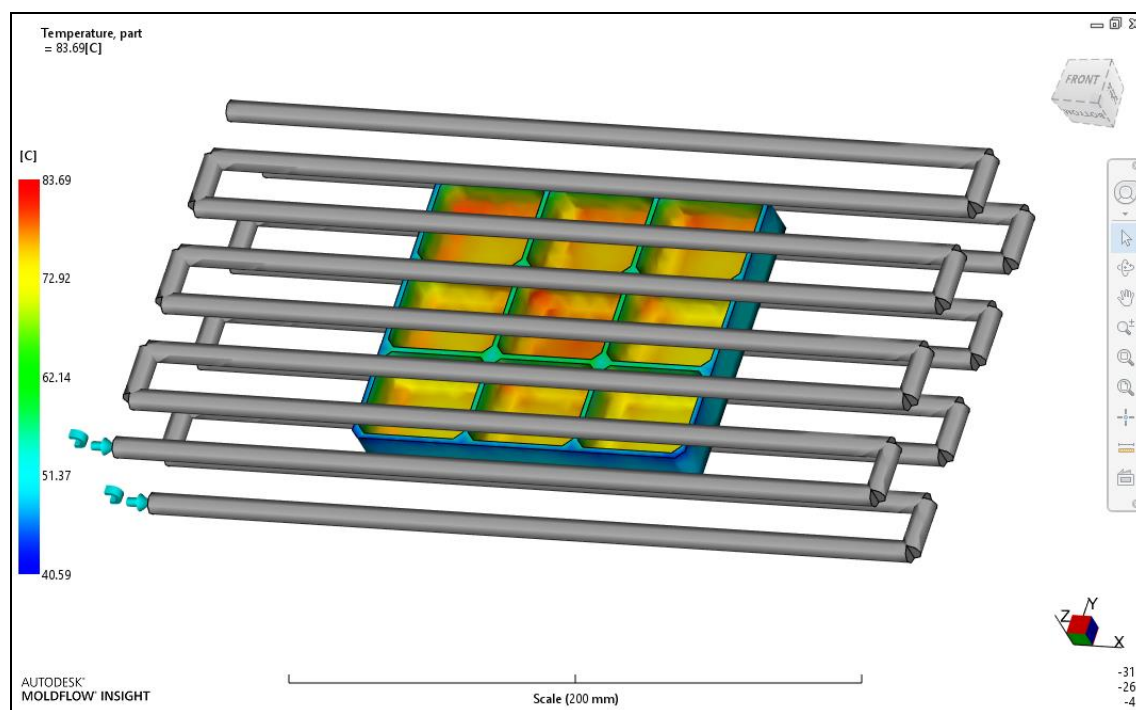


Figura 4 – Exemplo de simulação com melhor sistema de refrigeração em série.

Em seguida, se analisou os sistemas de refrigeração adicionando dois canais bubbler e posteriormente utilizando baffles nas cavidades com configurações de profundidade 15mm e 18mm. A Figura (5) exibe a configuração dos sistemas analisados.

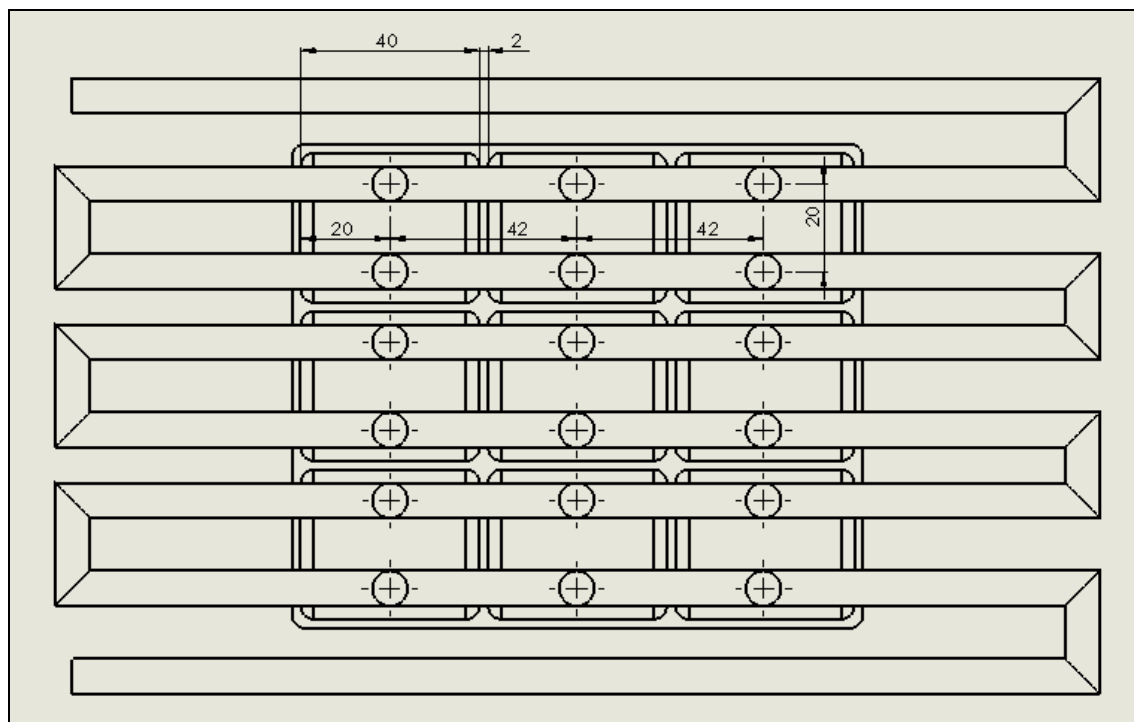


Figura 5 – Configuração das posições dos baffles/bubblers utilizadas.

Os valores das análises foram apresentados na Tab. (7) para a melhor configuração do sistema de refrigeração em série e para as configurações com sistemas baffles de profundidade 15 mm e 18 mm.

Tabela 7 – Resultados das simulações para a melhor configuração do sistema de refrigeração em série e para as configurações com sistemas baffles.

POM	Tempo de ciclo (s)	Temperatura média (°C)	Contração (%)	ABS	Tempo de ciclo (s)	Temperatura média (°C)	Contração (%)
Em série	18,6	56,6	5,5	Em série	51,7	36,7	2,3
Baffles prof. 15mm	18,6	53,4	5,5	Baffles prof. 15mm	51,0	36,7	3,0
Baffles prof. 18mm	18,6	53,4	5,5	Baffles prof. 18mm	50,2	36,5	3,0
PA6	Tempo de ciclo (s)	Temperatura média (°C)	Contração (%)	PP	Tempo de ciclo (s)	Temperatura média (°C)	Contração (%)
Em série	22,0	62,1	5,6	Em série	51,8	38,1	11,0
Baffles prof. 15mm	19,9	61,1	5,6	Baffles prof. 15mm	49,1	37,3	11,0
Baffles prof. 18mm	19,2	60,7	5,6	Baffles prof. 18mm	48,1	37,1	11,0

A Figura (6) exemplifica a configuração das simulações dos sistemas de refrigeração em série com canais baffles no interior das cavidades.

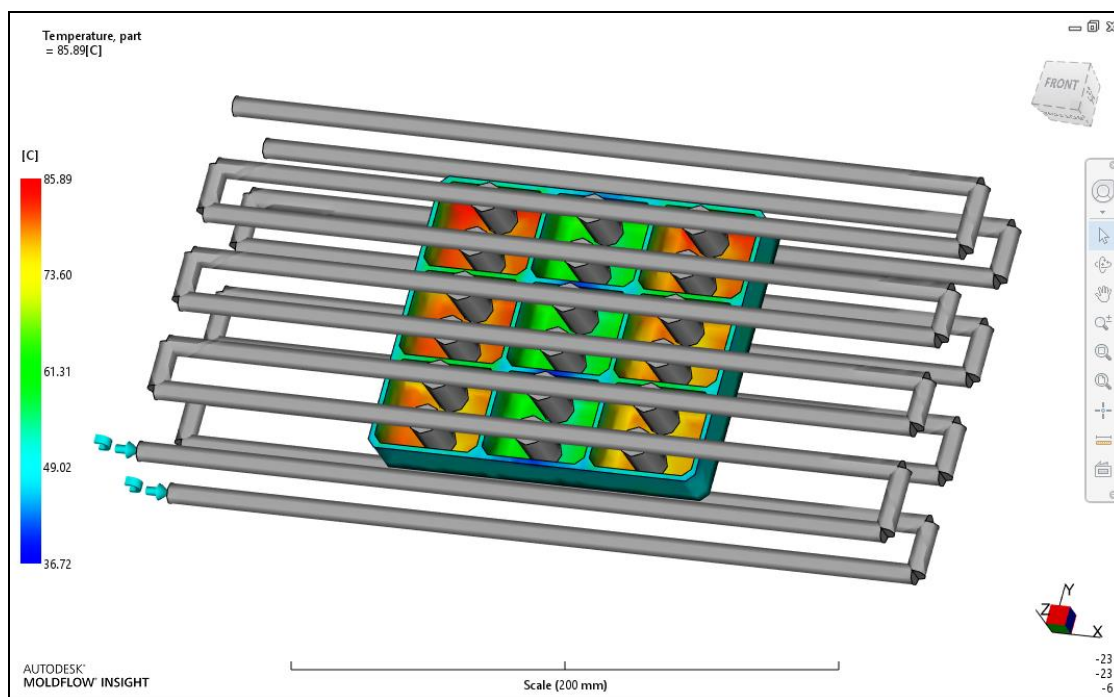


Figura 6 – Exemplo do sistema de refrigeração em série com canais *baffles* no interior das cavidades.

De acordo com as simulações realizadas, utilizando as mesmas configurações de posição, diâmetro e profundidade do canal para ambos os sistemas secundários, os resultados de tempo de ciclo, temperatura média e contração foram semelhantes para os quatro materiais.

Analisando o tempo de ciclo, a utilização do sistema *baffles* ou *bubbler* possibilita uma redução no tempo para o PA6 de 12,7%, para o PP de 7,1%, para o ABS apenas de 2,9% e nenhuma redução para o material POM. Observamos desta maneira que dependendo do material utilizado o tempo de redução de ciclo pode ser considerável e que novos estudos com casos em que as cavidades sejam mais profundas devem ser analisados afim de identificar se há uma diminuição considerável independentemente do tipo de material injetado.

4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados, foi possível analisar o processo de injeção por meio de simulações computacionais e otimizar o tempo de ciclo para os quatro materiais estudados, alterando apenas as configurações do sistema de refrigeração. O tipo de termoplástico utilizado na injeção tem grande influência no tempo de ciclo, demonstrado pela diferença de valores obtidos entre os materiais POM e PA6 comparado aos ABS e PP.

Os resultados demonstraram que é importante para a escolha do material em um certo componente injetado, levar em consideração o tempo de ciclo que o material polimérico irá gerar, pois neste estudo, o POM obteve um tempo de 18,6s, seguido do PA6 com 19,2s. Os materiais PP e ABS apresentaram um tempo de ciclo de 2,5 vezes maior que estes valores, alcançando no melhor dos casos estudados de 48,1s para o PP e 50,2s para o ABS.

Esses resultados podem ser explicados devido a grande diferença da condutividade térmica dos materiais que o PA6 e o POM são aproximadamente 2 vezes maiores comparados ao ABS e PP. Observa-se também que a temperatura de ejeção do PA6 e do POM é maior (tabela 1 e 2) comparado aos outros materiais, isso pode explicar a diferença do tempo de ciclo.

A variação da distância entre os canais e o produto, assim como a quantidade de canais associados com a distância entre os mesmos, influenciam no tempo de ciclo e temperatura média da peça. Portanto, quanto mais próximo o sistema de refrigeração do produto injetado e maior a quantidade de canais, menor o tempo de ciclo e a temperatura média. As contrações do material para as análises realizadas não apresentaram melhorias significativas.

Para o material POM não houve diminuição do tempo de ciclo utilizando sistemas de refrigeração com canais secundários. Logo, a melhor configuração do sistema de refrigeração para o componente analisado é o sistema com 8 canais principais em série, com diâmetro de canal e profundidade de 8mm, distância entre os canais de 20mm.

Com a utilização de sistemas de refrigeração secundários, *baffles* e *bubbler*, houve diminuição do tempo de ciclo para os materiais PA6, PP e ABS. É importante salientar que o grau de complexidade para a fabricação destes tipos de

sistema é muito maior se comparado ao sistema de refrigeração em série, portanto deve-se analisar os custos de fabricação dos moldes para verificar a viabilidade.

Futuras análises serão realizadas para averiguar a importância dos sistemas baffles e bubbler em peças com maior profundidade em suas cavidades como continuação deste estudo.

5. REFERÊNCIAS

- BERNER, J. A., 2016, "Análise e melhoria do sistema de refrigeração em materiais plásticos", TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Automotiva, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville.
- CENTIMFE, Centro Tecnológica da Indústria de Moldes Ferramentas Especiais e Plásticos (Org.), 2003, "Manual do Projectista para Moldes de Injeção de Plástico", Marinha Grande (Portugal): Centimfe.
- DIMLA, D. E.; CAMILOTTO, M.; MIANI, F., 2005, "Design and optimisation of conformal cooling channels in injection moulding tools", Journal of Materials Processing Technology, v. 164–165, p. 1294–1300.
- HARADA, J., 2004, "Moldes para injeção de termoplásticos: projetos e princípios básicos", São Paulo: Artliber.
- HARADA, J.; UEKI, M. M., 2012, "Injeção de termoplásticos: produtividade com qualidade", São Paulo: Artliber.
- MANRICH, S., 2013, "Processamento de termoplásticos: rosca única, extrusão, matrizes, injeção e moldes", 2. ed., São Paulo: Artliber.
- SWIFT, K. Plastics and polymer composites in light vehicles, 2014, "American Chemistry Council", p. 1–20, out., Disponível em: <<http://www.plastics-car.com/lightvehiclereport>>. Acesso em: 28 ago.2016.
- SZETEIOVÁ, K., 2010, "Automotive materials plastics in automotive markets today", Bratislava, p. 27–33, Disponível em: <http://www.mtf.stuba.sk/docs/internetovy_casopis/2010/3/szeteiova.pdf>. Acesso em: 23 ago.2016.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

OPTIMIZATION OF REFRIGERATION CYCLE TIME IN THERMOPLASTICS INJECTION MOLDING

Ricardo Felipe Junckes, ricardojunckes@gmail.com¹
Rafael Fernando Junckes, rafajunckes@gmail.com
Carlos Mauricio Sacchelli, Dr., carlos.sacchelli@gmail.com¹

¹ Federal University of Santa Catarina, 2700, Dr. João Colin Street, Joinville – SC - Brazil.

Abstract Currently the injected components are used in large scale in the most varied products because they have many advantages. Therefore, the development of injection molds is necessary. Injection molding are compound of several systems. In the manufacturing cycle of the injected component, the refrigeration time is the longest, and the refrigeration system is the main responsible. In this way, it is necessary to study this system to reduce production time. The objective of this study is to analyze and propose, with computer simulations in Moldflow® software, series refrigeration systems and systems with secondary channels (baffles and bubbler), with purpose to have a shorter cycle time. The results show the difference in cycle time, temperature and contraction of the part for the thermoplastic materials Polyoxymethylene (POM), Nylon (PA6), Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) and Polypropylene (PP). That there is optimization in cycle time using computational resources and the variation of the distance between the series cooling channels and the product, as well as the number of channels associated with the distance between them, influence the cycle time and the average temperature of the part. Secondary refrigeration systems decreased cycle time for three of the four materials evaluated.

Palavras-chave: injected component, injection molds, refrigeration system, cycle time, computer simulations.