

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

RICARDO FELIPE JUNCKES

ANÁLISE DE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO EM MOLDES PARA INJEÇÃO DE
TERMOPLÁSTICOS

Joinville

2017

RICARDO FELIPE JUNCKES

ANÁLISE DE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO EM MOLDES PARA INJEÇÃO DE
TERMOPLÁSTICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Automotiva, da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Joinville como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Dr. Carlos Maurício Sacchelli.

Joinville

2017

RICARDO FELIPE JUNCKES

ANÁLISE DE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO EM MOLDES PARA INJEÇÃO DE
TERMOPLÁSTICOS

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Automotivo e aprovado em sua forma final pelo Programa de Graduação em Engenharia Automotiva da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville, 30 de novembro de 2017.

Prof. Leonel R. Cancino, Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Banca examinadora:

Prof. Carlos Maurício Sacchelli, Dr. Eng.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Kelly Patricia Dias, M. Eng.
Instituto Federal de Santa Catarina

Felipe Marin, Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Universidade Federal de Santa Catarina, pelo curso de Engenharia Automotiva, que contribuíram para meu desenvolvimento intelectual e pessoal.

Agradeço a todos os professores do Centro Tecnológico de Joinville, em especial meu orientador professor Dr. Carlos Maurício Sacchelli pelo comprometimento em me auxiliar na graduação e por sua motivação em realizar diversos trabalhos de pesquisa e extensão, contribuindo no desenvolvimento acadêmico de diversos alunos.

À equipe EFICEM, por tornar possível aplicar os conhecimentos em sala e aprimorar os conhecimentos em áreas de projeto, gestão, logística e processo de fabricação.

Aos amigos, professores e colegas do EFICEM, por proporcionar a troca de conhecimentos, trabalho em equipe, incentivo e confraternizações ao longo de minha formação.

RESUMO

O peso dos veículos é um dos principais fatores no consumo de energia e emissão de CO₂ dos automóveis. Para tornar os veículos mais leves, o investimento em tecnologia e novos materiais têm aumentado ao longo dos anos no setor automotivo. A aplicação de polímeros é de grande importância, atualmente cerca de 50% do volume de um veículo de passeio é constituído de plástico, o equivalente a apenas 8,4% de seu peso total. Como grande parte destes polímeros são fabricados pelo processo de injeção de termoplástico, o desenvolvimento de moldes de injeção mais eficientes é de grande utilidade. O ciclo de injeção é formado pelas etapas de injeção, recalque, resfriamento, abertura do molde, extração da peça e fechamento. Neste ciclo, o tempo de refrigeração é o mais longo, portanto tem maior influência na produtividade da máquina, além de impactar na qualidade final do produto. O objetivo deste trabalho é analisar diversos sistemas de refrigeração e propor um sistema de melhor eficiência visando o menor tempo de resfriamento. As análises foram realizadas com o auxílio da simulação computacional utilizando o software *Moldflow*®. Os quatro termoplásticos utilizados para o estudo foram os mais empregados no setor automotivo, PP, PA6, ABS e POM. De acordo com os resultados, foi possível verificar que a aplicação de canais de refrigeração secundários reduz significativamente o tempo de ciclo para peças injetadas com cavidades, e quanto maior a profundidade da peça, mais relevante o emprego de canais secundários. Também se conclui que o material a ser utilizado para injeção é muito importante porque o tempo de ciclo pode ser muito maior de um material comparado com outro.

Palavras-chave: Setor automotivo. Molde de injeção. Termoplásticos. Sistemas de refrigeração. *Moldflow*®.

ABSTRACT

Vehicle weight is one of the most important factors in energy consumption and CO₂ emissions of a car. To make vehicles lighter, investment in technology and new materials have increased over the years in automotive sector. The application of polymers is of great importance, nowadays up to 50% of light vehicle volume is made of plastic, equivalent to only 8,4% of the total weight. Many of these polymers are manufactured by the injection process, therefore, the development of more efficient molds are very useful. For the injection process is necessary that the polymer is heated until its working temperature when becomes moldable and then inject into a mold with negative cavity for the polymer to have its final shape. The injection cycle is formed by stages of injection, holding pressure, cooling, mold opening, extraction and closing. In this process, the cooling time is the longest, therefore has greater influence on productivity of the injection machine and in the quality of the part. Thus, the objective of this work was analyzed different cooling systems and propose one system with greater efficiency aiming the shorter cycle time. The analysis were performed by computational simulation using Moldflow®. The four types of thermoplastics used in this study are the most applied in the automotive industry, PP, PA6, ABS and POM. According to the results, the use of secondary channels reduces significantly the cycle time, especially for parts with great depth, highlighting the importance for use secondary cooling channels. The material to be used for injection is very important because the cycle time may increase more than other.

Keywords: Automotive industry. Injection mold. Termoplastics. Cooling Systems, *Moldflow®*.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fórmula Molecular do ABS	18
Figura 2 – Forma molecular do POM	19
Figura 3 – Unidade repetitiva do PP.....	19
Figura 4 – Unidade repetitiva do PA.....	21
Figura 5 – Máquina injetora.....	21
Figura 6 – Estrutura Molde de injeção de duas placas.....	23
Figura 7 – Formas de conexão entre os canais de refrigeração de circuito U.	28
Figura 8 – Circuito em Z.....	29
Figura 9 – Modelo de circuito retangular em vários níveis.	30
Figura 10 – Modelo de sistema de refrigeração por placas.....	31
Figura 11 – Circuito de refrigeração utilizando tubos de cobre.	32
Figura 12 – Modelo de circuito para cavidades circulares.....	32
Figura 13 – Modelo de circuito de água inclinada.	33
Figura 14 – Sistema de refrigeração <i>bubbler</i> com canal de retorno.....	34
Figura 15 – Sistemas de refrigeração <i>bubbler</i> abaixo da cavidade.....	35
Figura 16 – Sistemas de refrigeração <i>baffles</i> e posição de montagem da lâmina separadora.	35
Figura 17 – Projeto 3D da geometria utilizada na simulação.	41
Figura 18 – Desenho técnico da geometria utilizada com profundidade de 20 mm. .	41
Figura 19 – Porta Molde MDL modelo 25.30.....	42
Figura 20 – Montagem placas cavidades e peça.	42
Figura 21 – Configuração de um sistema de refrigeração em série.	43
Figura 22 – Parâmetros propostos para variação do sistema de refrigeração.	45
Figura 23 – Simulação do sistema em série com menor tempo de ciclo para o PA6.	50
Figura 24 – Perfil de temperatura da peça em PA6 após resfriamento sem <i>baffles</i> ..	51
Figura 25 – Sistema de refrigeração em série com canais <i>baffles</i> no interior das cavidades para o PA6	53
Figura 26 – Perfil de temperatura da peça em PA6 após resfriamento com canais <i>baffles</i>	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características físicas de transformação de polímeros.....	16
Tabela 2 – Propriedades físicas e térmicas dos termoplásticos utilizados.....	44
Tabela 3 – Parâmetros de entrada da simulação.....	45
Tabela 4 – Dimensões para variação do estudo.....	46
Tabela 5 – Resultados das simulações para PA6.....	47
Tabela 6 – Resultados das simulações para POM.....	48
Tabela 7 – Resultados com menor tempo de ciclo para os quatro termoplásticos estudados.....	49
Tabela 8 – Resultados das simulações para a melhor configuração do sistema de refrigeração em série e para as configurações com sistemas <i>baffles</i>	52
Tabela 9 – Resultados obtidos para peça com profundidade 40mm.....	54
Tabela 10 – Resultados obtidos para peça com profundidade 60 mm.....	55

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Média de plásticos e polímeros compósitos usados em veículos leves em 2015 (libra/veículo).....	14
Gráfico 2 – Evolução longo prazo do uso de plásticos e polímeros compósitos em veículos leves (libra/veículo).....	14
Gráfico 3 – Ciclo básico de injeção.	24
Gráfico 4 – Tempo de ciclo em função da profundidade da peça para o termoplástico injetado POM.....	56
Gráfico 5 – Tempo de ciclo em função da profundidade da peça para o termoplástico injetado PA6.....	57
Gráfico 6 – Tempo de ciclo em função da profundidade da peça para o termoplástico injetado ABS.....	57
Gráfico 7 – Tempo de ciclo em função da profundidade da peça para o termoplástico injetado PP.....	58

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos	12
1.1.1 Objetivo geral.....	12
1.1.2 Objetivos específicos	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1 Mercado automotivo da injeção de plástico	13
2.2 Materiais poliméricos	15
2.2.1 Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS).....	18
2.2.2 Polioximetileno (POM)	19
2.2.3 Polipropileno (PP)	19
2.2.4 Nylon (PA6)	20
2.3 Máquina Injetora	21
2.4 Moldes para injeção de polímeros	22
2.5 Processo de injeção	24
2.6 Sistemas de refrigeração	26
2.6.1 Arquitetura do Sistema de Refrigeração	27
2.6.1.1 <i>Circuito em U</i>	28
2.6.1.2 <i>Circuito em Z</i>	29
2.6.1.3 <i>Circuito Retangular</i>	30
2.6.1.4 <i>Colocação de placas de refrigeração</i>	31
2.6.1.5 <i>Circuito utilizando tubos de cobre</i>	31
2.6.1.6 <i>Circuito para Cavidades Circulares</i>	32
2.6.1.7 <i>Circuito de Água Inclinada</i>	33
2.6.1.8 <i>Sistema de refrigeração borbulhante</i>	34
2.6.1.9 <i>Circuito de Refrigeração por lâminas separadoras</i>	35
2.7 Simulação Computacional.....	36
2.7.1 Softwares Comerciais para Processo de Injeção de Plástico	37
2.7.2 Interpretação dos Resultados Obtidos em Softwares Comerciais	37
3 METODOLOGIA	40

3.1 Geometria para simulação	40
3.2 Porta molde.....	42
3.3 Materiais poliméricos utilizados.....	43
3.4 Definição dos sistemas de refrigeração	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	47
4.1 Circuito em Série para geometria com profundidade de 20 mm	47
4.2 Comparação do sistema de refrigeração do circuito em série e com canais <i>baffles</i> para geometria com profundidade de 20 mm	51
4.3 Comparação do sistema de refrigeração do circuito em série e com canais <i>baffles</i> para geometria com profundidade de 40 mm e 60 mm	54
5 CONCLUSÃO	59
REFERÊNCIAS.....	61

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.

A utilização de componentes injetados plásticos está de acordo com esses interesses já que plásticos são mais leves que o aço, baratos, fáceis de fabricar, fácil montagem nos veículos e ainda assim garante segurança, conforto e boas propriedades mecânicas e químicas. (SWIFT, 2016; SZETEOIVÁ, 2010).

Segundo Szeteoivá (2010), originalmente os plásticos injetados foram indicados porque ofereciam boas propriedades mecânicas combinadas com excelente aparência, incluindo a facilidade de auto coloração. As aplicações de componentes plásticos na indústria automotiva vêm aumentando nas últimas décadas. O uso de plásticos e matérias compósitos em veículos leves aumentou de menos de 20 libras por veículo em 1960 para 334 libras por carro em 2015. (SWIFT, 2016).

Com o alto crescimento na aplicação de plásticos é desejado maior eficiência e produtividade. Para a obtenção de um componente injetado é necessário o molde de injeção, que é o valor de maior custo a ser gasto no desenvolvimento de um componente injetado.

O molde de injeção é composto dos seguintes sistemas: injeção, extração, e de refrigeração.

Em relação as fases do processo de injeção, tem-se o preenchimento, empacotamento, resfriamento e extração.

De acordo com Kitayama et al. (2016) na fase de preenchimento o plástico fundido preenche o molde com a injeção de pressão. Após é realizado a fase de empacotamento, o plástico fundido é compactado com alta pressão para adquirir a forma do molde desejada. Em seguida, é realizado o resfriamento para a solidificação do material, caracterizada pela fase de resfriamento e finalmente o sólido pode ser ejetado.

O custo-eficiência do processo é dependente no tempo gasto no ciclo. Correspondentemente a ela, a fase de resfriamento é o mais significativo tempo entre as etapas do ciclo, aproximadamente 50% do tempo total, portanto ela que determina a taxa no qual as peças são produzidas. (DIMLA et al., 2005).

Deste modo, a redução no tempo de resfriamento de cada ciclo é importante para aumentar a produtividade das peças injetadas.

Nesta perspectiva este estudo apresenta uma revisão bibliográfica de livros e artigos científicos sobre os principais tipos de sistemas de refrigeração em moldes para injeção de plásticos e suas aplicações. Este estudo propõe uma configuração do sistema de refrigeração mais eficiente para as geometrias em estudo, por meio de simulações computacionais com auxílio do software *Moldflow*®. Parâmetros como material, temperatura de injeção, temperatura de ejeção, dimensões das peças e parâmetros de canal foram variados, para que após uma análise dos resultados, sejam propostas otimizações visando a diminuição do ciclo de produção.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo foi analisar diversos sistemas de refrigeração, com o auxílio da simulação computacional com o software *Moldflow*®, e propor um sistema de melhor eficiência visando a diminuição do tempo resfriamento das peças injetadas.

1.1.2 Objetivos específicos

- Identificar e analisar parâmetros do sistema de refrigeração, sendo eles: número de canais, distância do canal ao produto, distância entre os canais e seus respectivos diâmetros;
- Avaliar o tempo de ciclo ao aplicar canais de refrigeração secundários;
- Avaliar a diferença do tempo de ciclo para diferentes termoplásticos;
- Verificar a influência da profundidade da geometria estudada no tempo de ciclo de injeção.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

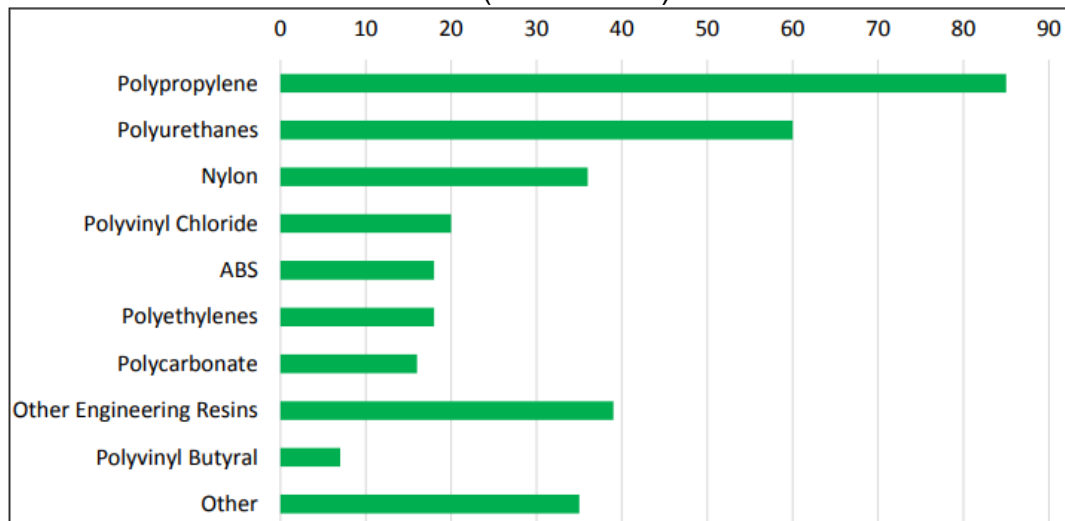
2.1 Mercado automotivo da injeção de plástico

Plásticos e polímeros compósitos têm sido essenciais para a ampla gama de avanços em segurança e performance dos veículos atuais. (SZETEOIVÁ, 2010). De acordo com Swift (2016), atualmente plásticos são aproximadamente 50% do volume para um veículo de passeio, mas cerca de 8,4% de seu peso total, o que torna os veículos mais leves e eficientes, resultando em baixas emissões de gases do efeito estufa.

O mercado automotivo é um importante mercado para termoplásticos como o polipropileno (PP), poliuretano (PU), nylon (PA), poliésteres termoplásticos e outros polímeros de engenharia. A aplicação em veículos leves representa mais de 30% da demanda para cada resina plástica. Os polímeros de engenharia como nylon, policarbonato e outros estão substituindo os metais em diversas aplicações. (SWIFT,2016).

O Gráfico 1, apresenta a quantidade das quinze resinas plásticas principais utilizadas em um carro. Destes polímeros usados em veículos leves, incluem 85 libras de PP, 59 libras de PU, 37 libras de PA, 21 libras de polivinil clorídrico (PVC), 17 libras de acrilonitrila butadieno estireno (ABS), 17 libras de resina de polietileno (PE) e 15 libras de resina de policarbonato (PC). (SWIFT,2016).

Gráfico 1 – Média de plásticos e polímeros compósitos usados em veículos leves em 2015 (libra/veículo).

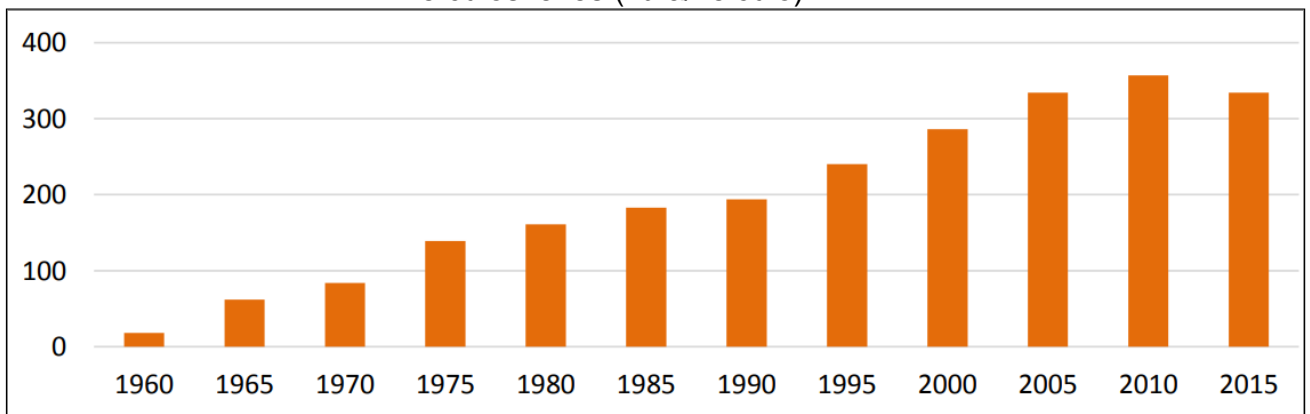


Fonte: Swift (2016, p.8).

Em 2015 os 14,38 milhões de veículos fabricados nos Estados Unidos e Canadá, necessitaram aproximadamente 4,8 bilhões de libras de plástico e polímeros compósitos, avaliado como um mercado de 5,9 bilhões de dólares, ou 408 dólares em cada veículo. (SWIFT,2016).

Veículos leves representam um importante mercado para plásticos e polímeros compósitos, que tem apresentado um significativo crescimento nas últimas cinco décadas. (SWIFT,2016). O Gráfico 2 apresenta a evolução do consumo de plástico em veículos leves entre 1960 e 2014.

Gráfico 2 – Evolução longo prazo do uso de plásticos e polímeros compósitos em veículos leves (libra/veículo).



Fonte: Swift (2016, p. 5).

É possível identificar que a média em 2015 teve uma pequena redução. O maior consumo médio de plástico por veículo foi em 2010, com cerca de 357 libras. A crescente popularidade de SUVs tem contribuído com o aumento do peso dos veículos na última década, responsável por essa redução da utilização de plástico. Logo, é importante observar que em 2000 o uso era de 286 libras, em 1990 apenas 194 libras e em 1960 menos de 20 quilos eram utilizados. (SWIFT,2016).

2.2 Materiais poliméricos

De acordo com Manrich (2010), polímero é qualquer material orgânico ou inorgânico, sintético ou natural, que tenha alto peso molecular e com várias estruturais repetitivas. Estas estruturas repetidas são formadas por várias moléculas de unidades estruturais menores, os monômeros, que tem baixo peso molecular. O grau de polimerização de um polímero entende-se como sendo o número de meros que compõem a cadeia polimérica. (HARADA, 2012).

Conforme Harada (2004), os materiais poliméricos através da pressão e calor, podem fluir e adquirir uma forma determinada. Os polímeros são classificados em dois grandes grupos, os termoplásticos e os termorrígidos, também conhecidos como termoestáveis.

Os termoplásticos têm como característica atingir o estágio de amolecimento ao serem aquecidos, podendo então ser moldados. Esta troca de estado não altera sua estrutura química, o que permite após resfriado, ele possa ser novamente aquecido e reaproveitado. (HARADA, 2004).

Os termoestáveis possuem a mesma propriedade de amolecimento ao serem aquecidos, porém este processo leva a uma transformação química em sua estrutura o que não permite sua reversão ao estado original, impedindo, portanto, a sua reutilização. (HARADA, 2004).

Segundo Harada (2012), o peso molecular bem como o seu grau de polimerização, estão diretamente associadas as propriedades físicas mecânicas e reológicas dos materiais poliméricos. Quanto maior o peso molecular maior será a resistência mecânica, resistência química, temperatura de transição vítrea, entre outras.

Segundo Manrich (2013), as propriedades de um polímero são altamente dependentes do grau de cristalinidade, bem como tamanho dos cristais e sua distribuição. A ordenação das moléculas do polímero em relação aos seus vizinhos e a si mesma define o grau de cristalinidade. As propriedades mais afetadas são:

- Solubilidade: diminui para materiais mais cristalinos, porque em regiões cristalinas a energia livre é mais baixa, ou seja, é preciso de mais energia para os cristais solubilizarem;
- Transparência: diminui com o grau de cristalinidade do polímero, polímeros amorfos puros são transparentes já os cristalizados podem ser translúcidos opacos ou transparentes;
- Modulo elástico: zonas cristalizadas resistem a deformação gerando altos módulos elásticos;
- Permeabilidade: a cristalinidade reduz a permeabilidade, mas também é dependente da temperatura do peso molecular, da morfologia, bem como das interações entre o polímero e o agente que o permeia;
- Volume específico: diminui com o grau de cristalinidade, portanto o peso específico aumenta.

A Tabela 1 apresenta os materiais poliméricos mais utilizados para injeção e suas respectivas características físicas.

Tabela 1 – Características físicas de transformação de polímeros.

	Nome genérico	Abreviatura	Peso específico (g/cm ³)	Temperatura de transformação (°C)	Temperatura máxima de resistência no serviço (°C)
Termoplásticos	Acetato de Celulose	CA	1,34	184 – 230	60
	Acetato – Butirato de Celulose	CAB	1,22	160 – 200	70
	Poliamida (Nylon)	PA	1,15	180 – 290	100
	Cloreto de Polivinila rígido	PVC	1,45	175 – 200	65
	Cloreto de Polivinila flexível	PVC	1,45	175 – 200	65

Tabela 1 - Características físicas de transformação de polímeros. (Continuação)

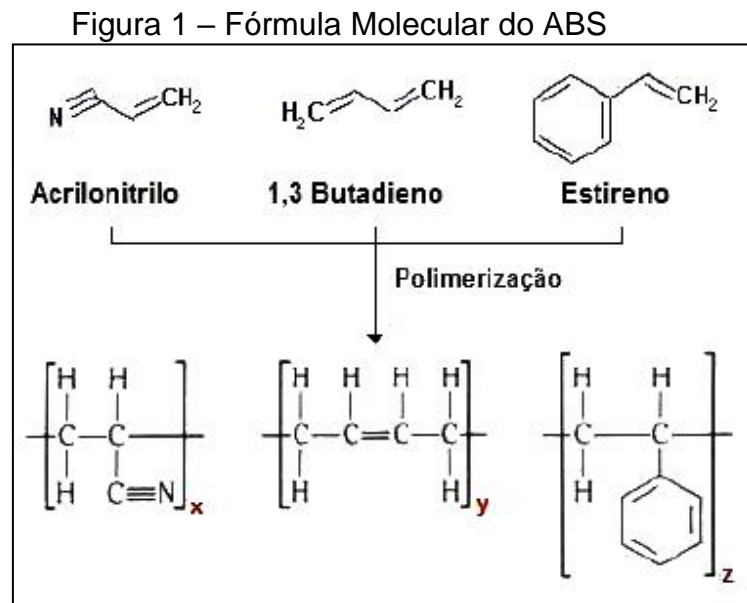
	Nome genérico	Abreviatura	Peso específico (g/cm ³)	Temperatura de transformação (°C)	Temperatura máxima de resistência no serviço (°C)
Termoplásticos	Polimetilmetacrilato	PMMA	1,18	180 – 230	80
	Poliestireno	PS	1,04	180 – 210	80
	Acrilonitrila – Butadieno Estireno	ABS	1,05	180 – 250	80
	Acrilonitrila - Estireno	SAN	1,08	220 – 240	85
	Polietileno Baixa Densidade	PEBD	0,92	150 – 175	90
	Polietileno Alta Densidade	PEAD	0,96	185 – 220	105
	Polipropileno	PP	0,91	200 – 220	140
	Polycarbonato	PC	1,2	240 – 290	130
	Polioximetileno (Acetal)	POM	1,4	175 – 190	95
Termofixos	Fenol – Formaldeído (Baquelita)	P.F	1,37	149 – 177	160
	Uréia – Formaldeído (Uréia)	U.F	1,45 – 1,55	135 – 188	135
	Melamina – Formaldeído (Melamina)	M.F	1,4 – 1,55	135 – 188	100
	Poliéster (com Fibra de Vidro)	U.P	1,6 – 2,1	120 – 180	120

Fonte: Harada (2004, p. 21).

As variações no peso específico dependem do valor de pressão de injeção quando o polímero será injetado, quanto maior a pressão maior será a densidade do componente injetado. (HARADA, 2004).

2.2.1 Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS)

Acrilonitrila butadieno estireno é um copolímero composto pela combinação dos três polímeros que dão o seu nome. A sua fórmula molecular é apresentada na Figura 1, e sua composição exata de cada componente depende da utilização final do produto para que este se destina. As proporções podem variar de 15% a 35% de acrilonitrila, 40% a 60% de estireno, com 5% a 30% de butadieno (ADIPLAST, 2017).



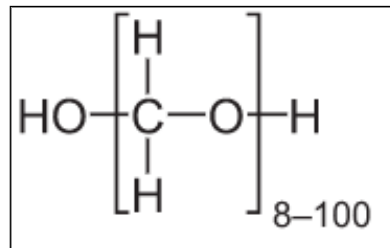
Fonte: CTB (2017).

O ABS possui resistência química aceitável, baixo índice de absorção de água e, portanto, bastante estabilidade dimensional. Além disso, apresenta alta resistência à abrasão. Fisicamente, é um material leve, fácil de moldar, mas ainda assim resistente, oferecendo um bom equilíbrio entre resistência à tração, ao impacto e à abrasão, dureza superficial, rigidez, resistência ao calor, resistência química, boas características elétricas e mantém as suas propriedades em baixas temperaturas. Sua coloração possibilita a reprodução de cores muito vívidas e saturadas, o que torna o ABS muito usado para acabamentos de peças que necessitam de alto brilho, tem grande aplicação nos painéis dos veículos e para materiais moldados diversos. (ADIPLAST, 2017; SZETEIOVÁ, 2010).

2.2.2 Polioximetileno (POM)

Também chamado de poliacetal, é obtido a partir da polimerização do formaldeído, sua fórmula molecular é apresentada na Figura 2.

Figura 2 – Forma molecular do POM



Fonte: Morassi (2013).

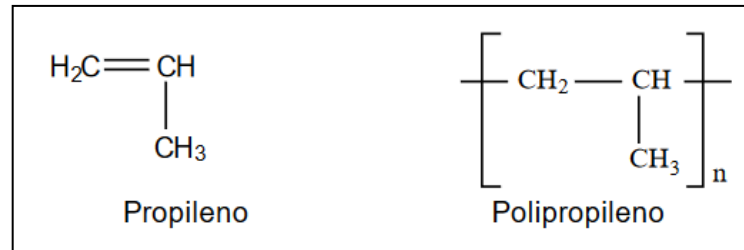
É um termoplástico com resistência a combustível e compostos químicos, além de ter uma absorção de umidade extremamente baixa, proporcionando ótima estabilidade dimensional. (ADIPLAST, 2017). Tem boas características de usinabilidade e um bom polimento. Por possuir excelentes propriedades auto lubrificantes, suas principais aplicações em um veículo são em pequenas engrenagens, buchas, sistemas de combustíveis. (SWIFT, 2010).

2.2.3 Polipropileno (PP)

O polipropileno (PP) é um polímero de hidrocarboneto linear, que contém pouca ou nenhuma insaturação (NUNES, 2015). A

Figura 3 exibe a unidade repetitiva do PP.

Figura 3 – Unidade repetitiva do PP.



Fonte: Nunes (2015, p.48).

Szeteiová (2010) descreve que o PP é o material mais utilizado na indústria automotiva, por apresentar diversas características mecânicas adequadas com diversas variedades entre os tipos de PP utilizados, além de ser extremamente resistente quimicamente e quase totalmente impermeável. Podendo ser aplicado em diversos componentes automotivos, como: bombas automotivas, tanques químicos, carcaça de faróis, caixas de bateria, isolamento de cabos, carpetes internos, entre outros.

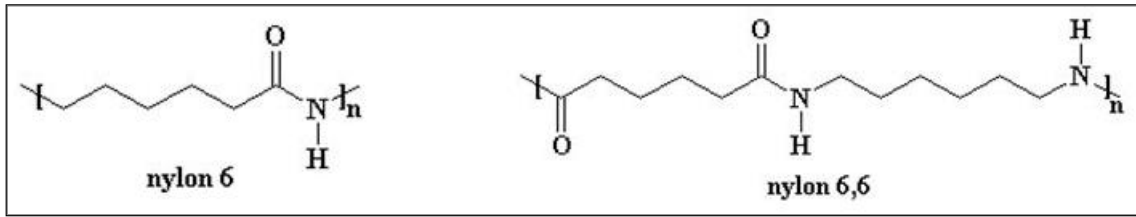
Segundo Nunes (2015) as principais características que devem ser observadas para a injeção do PP são:

- A viscosidade no estado fundido do PP é sensível a variações de temperatura. Por ser um polímero semicristalino, o PP se contrai no molde durante o resfriamento e possui facilidade de oxidação em temperaturas elevadas;
- A temperatura do molde não deve ultrapassar 95°C, pois altas temperaturas acarretam sensíveis influências sobre as propriedades físicas do produto final;
- A temperatura de injeção não deve ser superior a 270°C, pois a viscosidade do material é muito baixa, podendo oxidar o polímero facilmente nessas condições;
- A contração do PP, durante o resfriamento no molde é muito maior do que em polímeros amorfos que se situam na faixa de 1 a 2%.

2.2.4 Nylon (PA6)

O nylon consiste no mais conhecido representante de uma categoria de materiais chamados poliamidas (PA6), a Figura 4 apresenta sua unidade repetitiva.

Figura 4 – Unidade repetitiva do PA



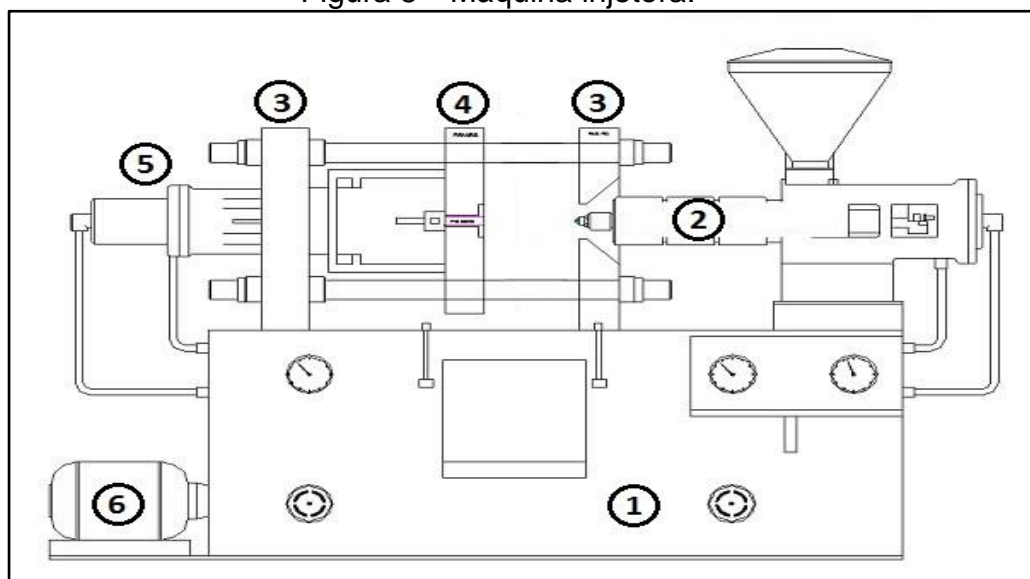
Fonte: ADIPLAST (2017).

Suas principais propriedades são, alta resistência mecânica, grande rigidez e boa estabilidade sob o calor, ótima resistência ao desgaste e ao tracionamento. É usado para gaiolas de rolamento, como isolantes elétricos, e muitas outras peças técnicas. É também utilizada como fibra em tapetes e forrações, tecidos técnicos, cordoanéis para pneus, correias transportadoras e mangueiras. (MORASSI, 2013).

2.3 Máquina Injetora

De acordo com Harada (2012), uma injetora pode ser definida como uma máquina que conforma peças de maneira descontínua, em ciclos, principalmente de matérias plásticas. A Figura 5 exibe um modelo de máquina injetora utilizada atualmente nas indústrias, que são compostas por basicamente seis componentes principais, enumerados após a Figura 5.

Figura 5 – Máquina injetora.



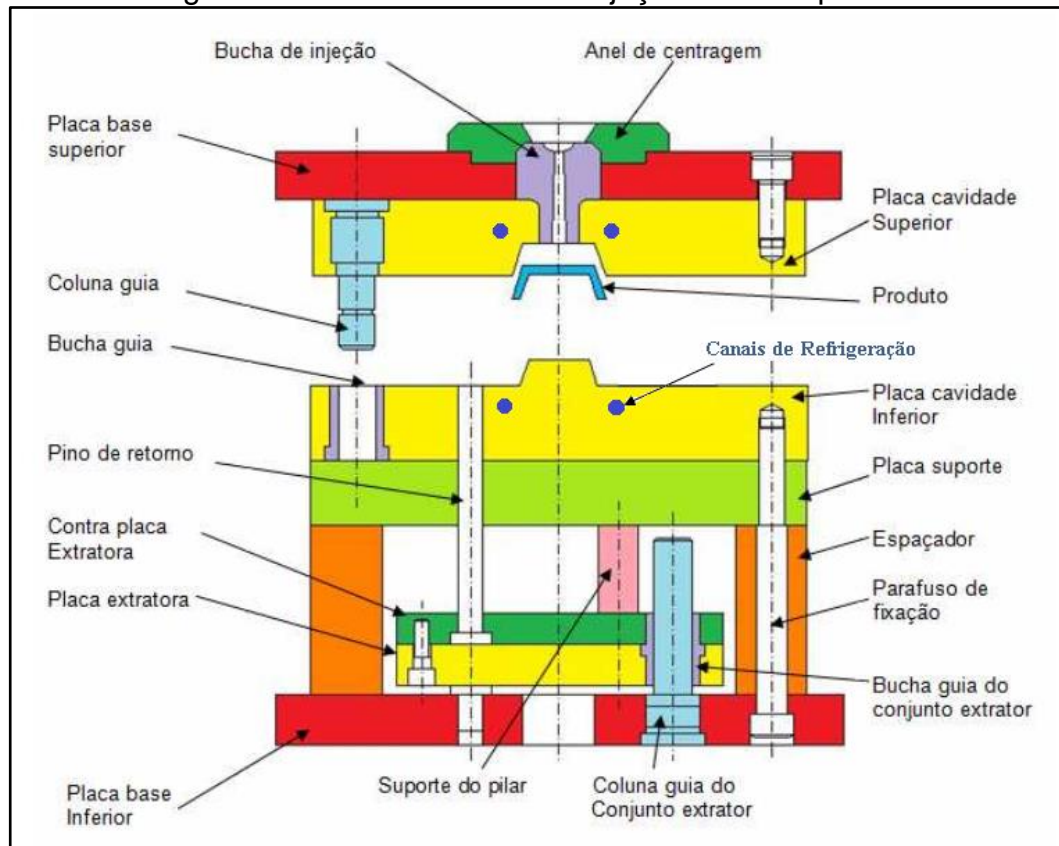
Fonte: CADguru (2016).

1. Base: responsável por sustentar as demais partes da máquina garantindo rigidez e absorção de vibração não desejadas. Além disso, contém os componentes do sistema hidráulico, como o reservatório de óleo e o motor elétrico;
2. Conjunto injetor: é formado pelos componentes responsáveis pela injeção e tem como função aquecer e garantir fluidez para o avanço do polímero trabalhado ser injetado ao molde. Este conjunto pode deslocar-se permitindo afastar e aproximar o bico de injeção para a bucha de injeção do molde;
3. Placa fixa ou estacionária: responsável pelo apoio do molde que leva a bucha de injeção e centralização do mesmo, tendo assim diversas ranhuras e furos para permitir a centralização do conjunto. Além disso suporta as colunas da máquina, nas quais são efetuados os movimentos da placa móvel;
4. Placa móvel: serve de suporte para a parte móvel do molde onde se situa o sistema de extração, responsável pela retirada do produto do molde;
5. Conjunto de fechamento: serve para o deslocamento da placa móvel, controlando a abertura e fechamento do molde. Na sua estrutura, encontram-se o sistema hidráulico responsável pelo deslocamento e para o acionamento dos pinos extratores;
6. Circuito hidráulico: formado pelo motor e sistema hidráulico é responsável pelo acionamento de todos os movimentos da máquina injetora.

2.4 Moldes para injeção de polímeros

Conforme Harada (2004), o molde de injeção é constituído de várias placas, apresentado na Figura 6. Destaca-se a importância das placas cavidades, que possuem o formato da peça desejada e normalmente está em temperaturas baixas, solidificando rapidamente o polímero quente que preenche seus vazios.

Figura 6 – Estrutura Molde de injeção de duas placas.



Fonte: Adaptado de Harada (2004, p. 184).

Para que o polímero chegue até as placas cavidades, ele deve fluir através de canais, passando pela bucha de injeção e pelos canais de distribuição, também conhecidos como canais de alimentação. Na entrada da cavidade do formato do produto, o polímero passa pelo ponto de injeção que é uma estreita passagem, separando o produto do sistema de alimentação. (HARADA, 2004).

Para que um molde desempenhe suas funções, é necessário satisfazer alguns requisitos: possuir uma ou mais cavidades com a forma da peça a ser produzida, assegurando as características dimensionais dos ciclos; permitir o enchimento das cavidades com o polímero fundido, através dos sistemas de canais; facilitar o resfriamento do material polimérico dentro das cavidades; promover a extração das peças injetadas. Os sistemas funcionais que permitem as funções citadas acima são: centragem; guiamento e alinhamento, saída de gases, controle de temperaturas e extratores. (HARADA, 2004).

2.5 Processo de injeção

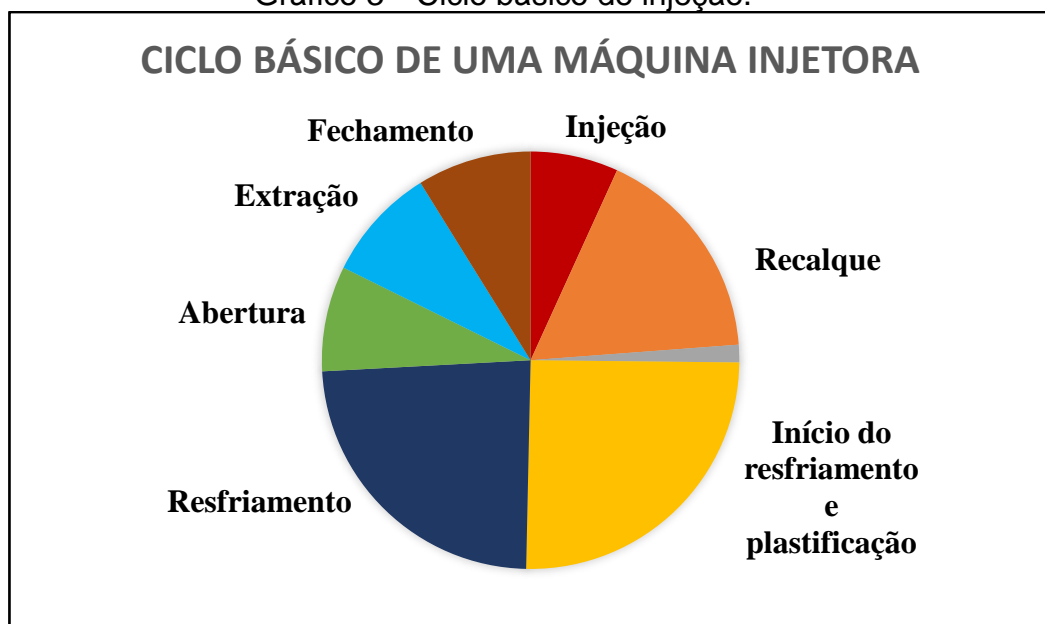
Segundo Harada (2012) a moldagem por injeção é a técnica mais importante para a transformação de produtos plásticos nas mais variadas formas, com uma série de vantagens. Proporcionando elevada reprodutibilidade e fabricação de geometrias complexas com pequenas tolerâncias. Tornando possível que o produto 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.

Para o aumento da produtividade, deseja-se obter ciclos mais curtos. Como o custo operacional por hora de uma máquina é constante, ciclos mais rápidos resultam peças de menor custo. (HARADA, 2004).

O tempo de resfriamento é o mais longo e depende da espessura da peça injetada, da temperatura do molde e das características do termoplástico. (HARADA, 2004). No Gráfico 3, é exibido uma representação do tempo de ciclo na moldagem por injeção.

Gráfico 3 – Ciclo básico de injeção.



Fonte: Harada, (2004, p. 53).

O ciclo de injeção inicia com a alimentação do polímero no funil de alimentação da máquina injetora. Em seguida, a rosca da máquina injetora atua como fuso de rosca sem fim e começa a girar; avançando polímero fundido, gerado pelo aquecimento por meio de resistências localizadas ao redor do fuso, até a parte frontal próxima ao bico de injeção. Assim que o polímero está homogeneizado, com quantidade adequada e o molde esteja vazio e fechado, a rosca age como se fosse um pistão, fazendo movimento para frente, injetando a massa fundida para dentro do molde. Esta fase é chamada etapa de injeção e deve ser finalizada quando todas as cavidades do molde estiverem preenchidas e devidamente pressurizadas. Pelo fato de a rosca atuar ora como fuso sem-fim, ora como pistão, ela recebe o nome de rosca recíproca. (HARADA, 2014; MANRICH, 2013).

Terminada a fase de injeção, a rosca deve permanecer certo tempo em posição avançada, mantendo uma pressão igual ou menor que a pressão de injeção. Esta etapa é chamada de recalque ou empacotamento e serve para evitar que o polímero fundido retorne em direção ao fuso, para não haver espaços sem preenchimento no molde. Finalizado a fase de recalque, o bico se fecha, gira e se afasta para a próxima dosagem. (HARADA, 2014; MANRICH, 2013).

De acordo com Harada (2014), assim que o molde foi totalmente preenchido pela massa, se inicia o processo de resfriamento do material e só finaliza quando o produto adquire suficiente rigidez, para ser extraída sem prejudicar seu aspecto e geometria.

O processo de resfriamento se inicia no momento em que o material fundido entra em contato com a superfície metálica resfriada do molde, ou seja, mesmo durante o processo de injeção o polímero fundido presente no molde já está sendo resfriado. O tempo de resfriamento é controlado para que a peça seja extraída quando a região mais quente do moldado atinja a temperatura de extração recomendada pelo fabricante. (HARADA, 2014).

Finalizada a etapa de resfriamento, o molde é aberto e ocorre o acionamento dos extratores responsáveis por atuar no produto retirando-o da área do molde. Feita a extração o ciclo é finalizado. (HARADA, 2014).

2.6 Sistemas de refrigeração

Geralmente, os moldes de injeção são resfriados com água através de canais de refrigeração próprios dos moldes. O resfriamento por meio de furos é o método mais comum por ser mais conveniente e econômico. (HARADA, 2004).

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).

Segundo Harada (2012), o tempo de resfriamento é um fator que mais afeta a produtividade porque normalmente é a etapa mais longa do ciclo de moldagem por injeção. Esse tempo é controlado pela quantidade de calor acumulada no polímero fundido e a taxa com que será extraído do moldado. É nesta etapa que se controla três importantes aspectos da qualidade, o acabamento superficial da peça moldada, o grau de cristalinidade e tensão residual (relaxação da orientação molecular) propriedade dependente do tempo de ciclo.

Harada (2004), propõe que o projetista do molde observe os seguintes pontos para o projeto do sistema de refrigeração:

- O meio de resfriamento não deve ser colocado muito próximo da superfície do molde, porque provoca pontos mais frios, além de produzir falhas na moldagem, tais como linhas de junção do material. Deve-se ter cuidado para evitar que os furos de resfriamento estejam próximos demais da superfície do molde evitando o perigo de a pressão do material plástico fundido na cavidade provoque um colapso localizado no molde. Ao mesmo tempo, o resfriamento não deve estar distante da superfície aquecida, caso isso aconteça o projeto se torna ineficiente;
- A quantidade de resfriamento deve ser suficiente para manter a temperatura do molde quando este estiver em produção máxima. O resfriamento é preferivelmente fornecido nas placas de encosto, ainda que seja necessário um resfriamento adicional no interior do molde;
- As conexões de entrada e saída do molde devem estar do mesmo lado, e normalmente, na parte posterior da máquina, afim de não restringir os movimentos do operador;

Uma variação de temperatura através da superfície do molde provoca diferentes velocidades de refrigeração. Que resulta em tensões térmicas e conseqüentemente produzirá peça distorcidas se a variação de temperatura for elevada. (HARADA, 2004). Para minimizar os efeitos de contração do polímero, é recomendável que a diferença de temperatura entre o lado macho e a cavidade do molde não ultrapasse os 10°C. (SACCHELLI, 2002).

O fluxo de água nos canais deverá ser suficientemente rápido para que a temperatura de saída não seja superior a 5°C. (HARADA, 2004).

2.6.1 Arquitetura do Sistema de Refrigeração

Centimfe (2003) descreve que os sistemas de refrigeração para controle de temperatura dependem principalmente da forma e dimensões da peça, porque é a cavidade que define o espaço existente para a implementação dos circuitos de refrigeração, podendo assumir diversas formas e classificados pelos seguintes tipos: de furação, com canal usinado, *bubbler*, *baffles*, barras refletoras e canais que acompanham o contorno da peça.

Muitas vezes o projeto de um sistema de refrigeração é feito pela associação dos diferentes tipos de arquitetura, que serão apresentados a seguir, afim de fabricar um sistema eficiente e com custo de fabricação acessível.

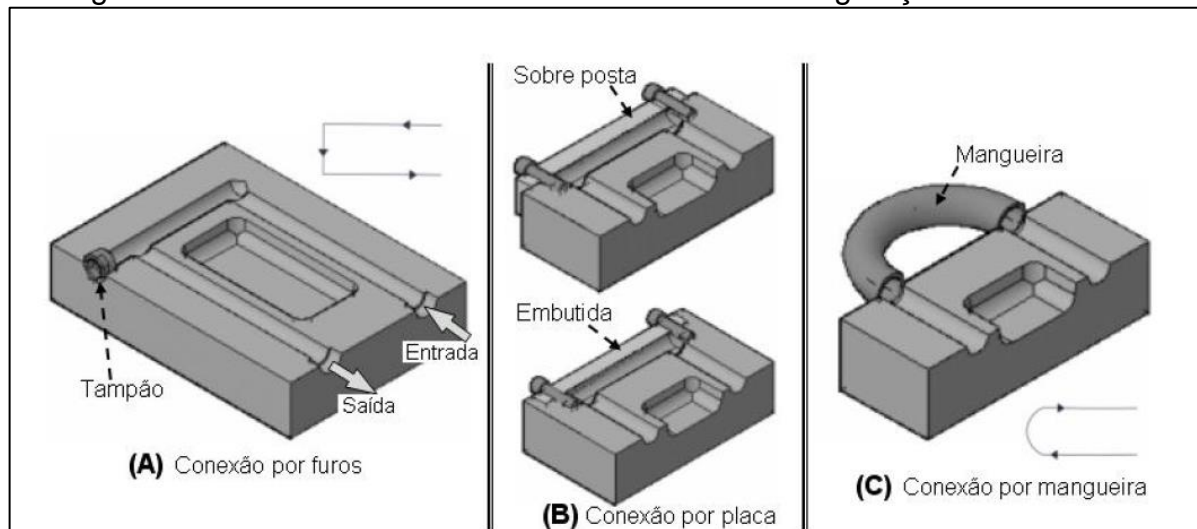
Como o sistema de refrigeração não funciona sozinho no molde, já que existem sistemas de alimentação e extração, a solução do projeto de um sistema de refrigeração é analisar a arquitetura ideal com o que é possível fabricar.

Em algumas aplicações pode ser necessário o uso de resistências elétricas para algum aquecimento específico, ou de gases, mas em geral o sistema de refrigeração trabalha com líquidos como água ou óleo para troca de calor (CENTIMFE, 2003). Devido estas particularidades, circuitos com uso de resistência elétricas, ou de gases, não serão discutidos neste trabalho.

2.6.1.1 Circuito em U

Segundo Centimfe (2003) o tipo de circuito em U é geralmente utilizado para a refrigeração de cavidades longas e estreitas, sendo que a conexão dos canais responsáveis pela refrigeração pode ser feita por três maneiras diferentes, conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Formas de conexão entre os canais de refrigeração de circuito U.



Fonte: Adaptado de Centimfe (2003, p.15 e p.16).

A conexão por furos, também conhecida por furação cruzada é a solução mais eficiente e que apresenta menores problemas de fugas de água. É feita uma furação de forma a promover a ligação interna entre os canais de refrigeração, e em sua extremidade utiliza-se um tampão para fechar o circuito. (CENTIMFE, 2003).

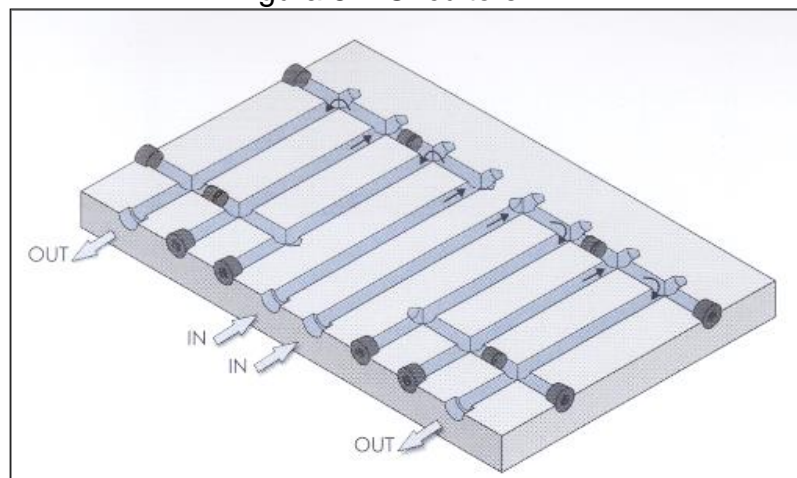
A forma de conexão por mangueiras é utilizada para redução do custo de fabricação, produzindo um molde barato, com a conexão projetada no lado externo da placa. Porém sua eficiência é menor e pode implicar dificuldades na montagem e transporte, ocasionando danos na mangueira. (CENTIMFE, 2003).

Para casos em que a conexão de mangueiras não pode ser utilizada devido ao grande número de montagens e transportes, utiliza-se a conexão por placas tendo um preço médio entre as outras duas configurações, mas que permite melhor manuseio do molde. As placas são fixas sobrepostas ao molde por parafusos e para vedação recorre-se a juntas de borracha. Com a aplicação da placa sobreposta é necessário usinar um canal na extremidade do molde, enquanto ao empregar a placa embutida o canal é realizado na placa. (CENTIMFE, 2003).

2.6.1.2 Circuito em Z

O circuito em Z é basicamente variação do circuito em U, com várias interligações, sendo aplicado em casos com grandes áreas para refrigeração. Neste tipo de circuitos é preferível que o número de canais seja par, para que a entrada e saída estejam do mesmo lado. Na Figura 8, é exemplificado um circuito em Z. (CENTIMFE, 2003).

Figura 8 – Circuito em Z.



Fonte: Centimfe (2003, p.16).

A Figura 8 apresenta um sistema de refrigeração com dois circuitos em Z simétricos, com entradas no centro e saída nas extremidades. Neste caso são necessários dois canais de entrada e dois canais de saída, para que o aumento de temperatura do fluido, desde a entrada até a saída do molde, não exceda os 5 graus Celsius. (CENTIMFE, 2003).

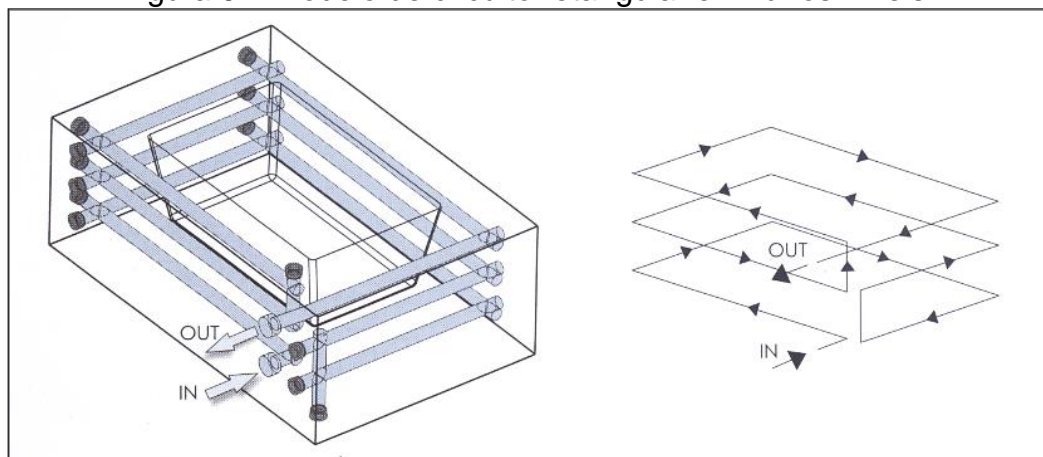
Como os canais de refrigeração são feitos por diversas furações, não é possível fabricar circuitos com curvas. Para configurar os circuitos em Z são necessários diversos tampões de fecho, de forma a criar os desvios de percurso necessários. (CENTIMFE, 2003).

2.6.1.3 Circuito Retangular

Este tipo de circuito é usado para o arrefecimento de paredes laterais de peças retangulares, permitindo um controle térmico mais uniforme que o circuito em U, visto que todas as faces são refrigeradas. (CENTIMFE, 2003).

Nestes circuitos, para que o arrefecimento seja o mais uniforme, a distância entre os canais de entrada e saída deve ser o menor possível. Para cavidades profundas é necessário que o circuito tenha diversos níveis, a Figura 9 apresenta um modelo de circuito retangular com diversos níveis. (CENTIMFE, 2003).

Figura 9 – Modelo de circuito retangular em vários níveis.



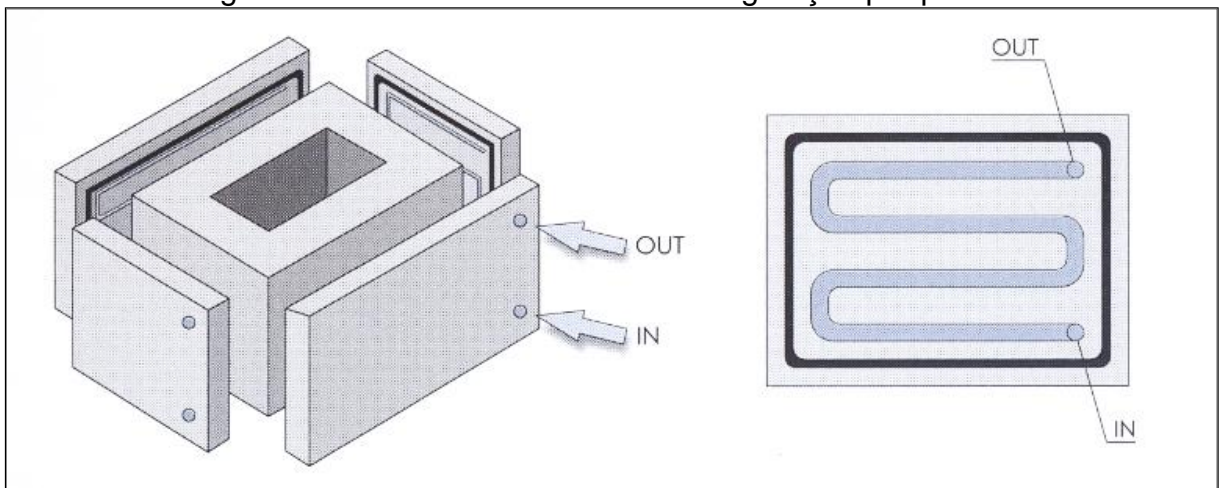
Fonte: Centimfe (2003, p.17).

Nota-se que o sistema é único facilitando o manuseio do molde, já que existe apenas uma mangueira de entrada do fluido e uma de saída. Entretanto, deve-se analisar o sistema para que a temperatura da água não aumente demais. Para estes casos ou casos em que a cavidade é muito profunda, a melhor configuração é utilizar diversos circuitos retangulares independentes com diferentes profundidades, permitindo assim que o fluido de refrigeração fique menos tempo no molde, logo a diferença de temperatura entre a entrada e saída é menor. A desvantagem é a necessidade de diversas mangueiras de entrada e saída do molde prejudicando o tempo de montagem do molde na injetora e armazenamento. (CENTIMFE, 2003).

2.6.1.4 Colocação de placas de refrigeração

Outro método de refrigeração é a fabricação de placas com canais de refrigeração usinados, que são fixadas ao redor do molde por meio de parafusos ou solda. A vedação é promovida por juntas de vedação à semelhança das utilizadas nas juntas do cabeçote de um motor a combustão interna. A Figura 10 exibe uma aplicação para este tipo de sistema. (CENTIMFE, 2003).

Figura 10 – Modelo de sistema de refrigeração por placas.



Fonte: Centimfe (2003, p.17).

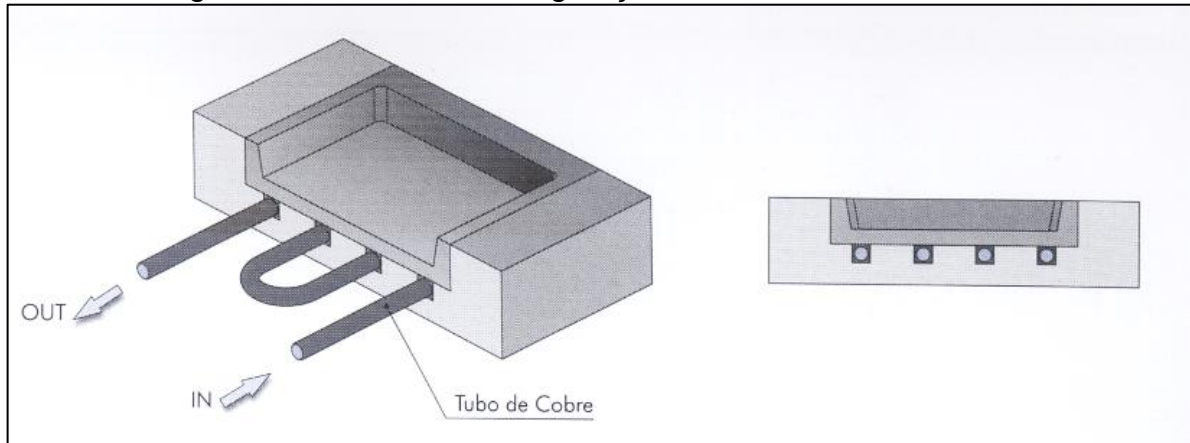
Recomenda-se esta solução quando se deseja controlar a temperatura individual de cada parede da cavidade ou em casos que é possível utilizar o mesmo sistema de refrigeração para diferentes cavidades, sendo necessário a fabricação somente dos insertos das cavidades. (CENTIMFE, 2003).

Este tipo de refrigeração é pouco utilizado em moldes de injeção atualmente, suas principais aplicações são em moldes para fabricação de peças por sopro. (CENTIMFE, 2003).

2.6.1.5 Circuito utilizando tubos de cobre

Outra alternativa quando se pretende utilizar insertos para as cavidades do molde, é a utilização de tubos de cobre conformáveis, como representado na Figura 11.

Figura 11 – Circuito de refrigeração utilizando tubos de cobre.



Fonte: Centimfe (2003, p.18).

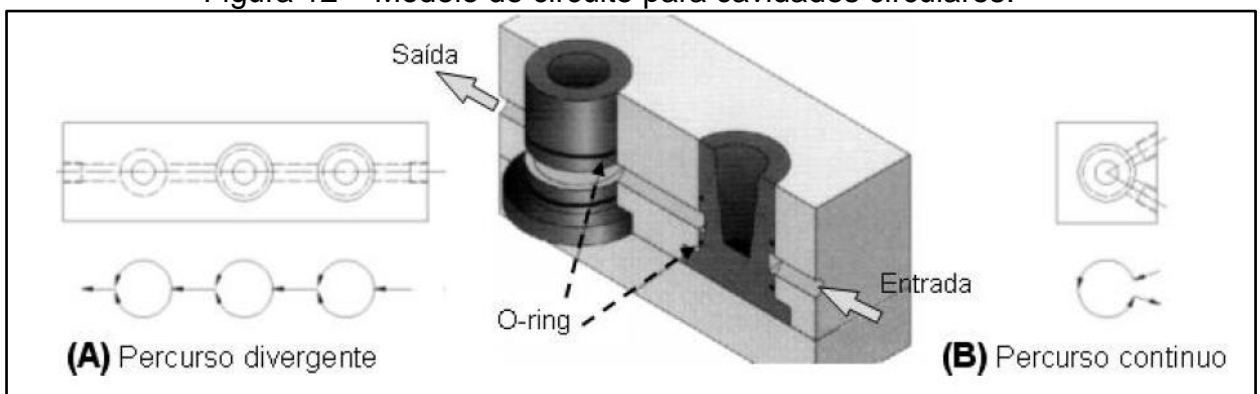
A folga entre o tubo de cobre e o inserto deve ser preenchida por uma liga metálica de baixo ponto de fusão, para que a transferência de calor entre o tubo de cobre e o inserto seja eficiente. (CENTIMFE, 2003).

2.6.1.6 Circuito para Cavidades Circulares

Para fabricação de peças circulares os sistemas com canais retos não são aconselháveis já que não permitem acompanhar a forma da peça e, portanto, provocam o arrefecimento não uniforme e conseqüentemente as peças sairiam deformadas. (CENTIMFE, 2003).

Uma das soluções é a fabricação de insertos circulares com canais de refrigeração usinados em sua superfície que após alojadas ao molde permitem que o fluido acompanhe a forma da peça, como representado na Figura 12. (CENTIMFE, 2003).

Figura 12 – Modelo de circuito para cavidades circulares.



Fonte: Adaptado de Centimfe (2003, p.17).

Neste tipo de circuitos, o percurso pode ser de forma divergente, quando o fluido de refrigeração se divide e contorna o postigo pelos dois lados, ou pode-se utilizar o percurso contínuo, fazendo com que todo o fluido contorne toda a circunferência do postigo. (CENTIMFE, 2003).

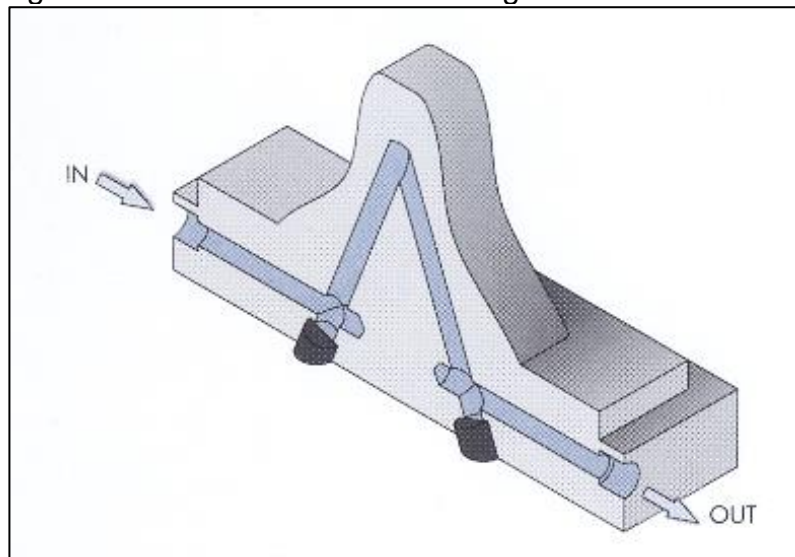
O percurso de forma divergente tem como vantagem a aplicação para moldes com diversas cavidades em série, enquanto o percurso contínuo permite a entrada e saída do fluido do mesmo lado do molde. (CENTIMFE, 2003).

O circuito por cavidades circulares tem o inconveniente de necessitar utilização de vedação, que na maioria dos casos é utilizado *O-rings*, como pode-se observar na Figura 12. (CENTIMFE, 2003).

2.6.1.7 Circuito de Água Inclinada

Em casos que a cavidade é profunda e com forma complexa, uma das soluções é utilizar no macho, o circuito de água inclinada, ligadas no topo, como na Figura 13. (CENTIMFE, 2003).

Figura 13 – Modelo de circuito de água inclinada.



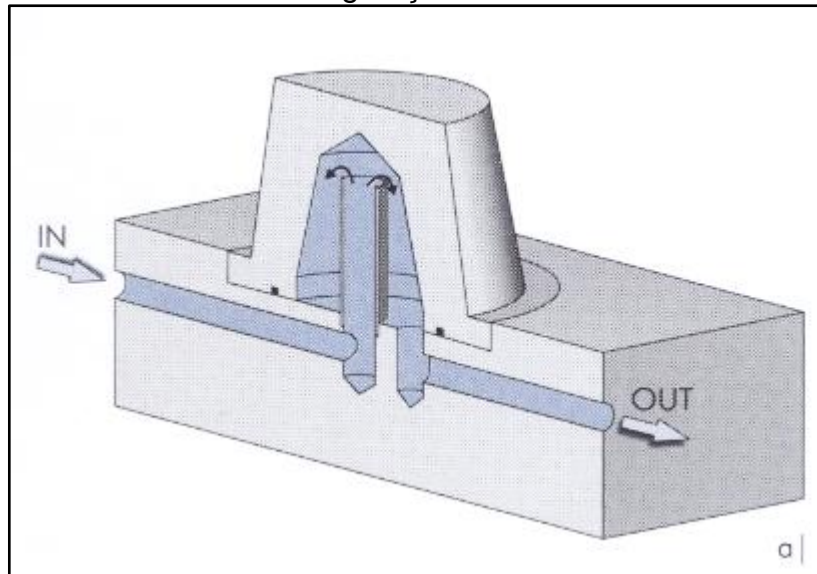
Fonte: Centimfe (2003, p.22).

O grande inconveniente desta solução é que na maioria dos casos o arrefecimento será pouco uniforme, já que dificilmente o circuito acompanhará a forma da peça. (CENTIMFE, 2003).

2.6.1.8 Sistema de refrigeração borbulhante

Outra alternativa é a utilização de circuito sistema borbulhante também designado por *bubbler*, ou circuito em cascata com núcleo de refrigeração. É comumente utilizado no interior do macho, conforme representado na Figura 14. (CENTIMFE, 2003).

Figura 14 – Sistema de refrigeração *bubbler* com canal de retorno.

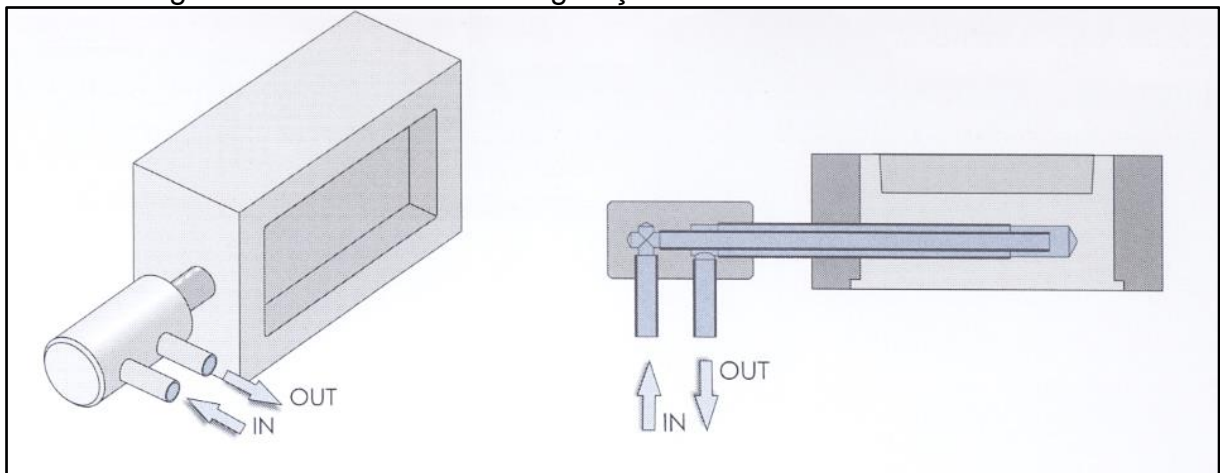


Fonte: Centimfe (2003, p.22).

Este sistema consiste fundamentalmente na introdução de um tubo, no interior de um furo realizado na placa cavidade, por onde entra o fluido de refrigeração que depois escoa pelas paredes e sai por um canal de saída. (CENTIMFE, 2003).

Em casos de falta de espaço que não permite criar um canal de retorno, o sistema *bubbler* pode ser utilizado conforme exemplificado na Figura 15. (CENTIMFE, 2003).

Figura 15 – Sistemas de refrigeração *bubbler* abaixo da cavidade.



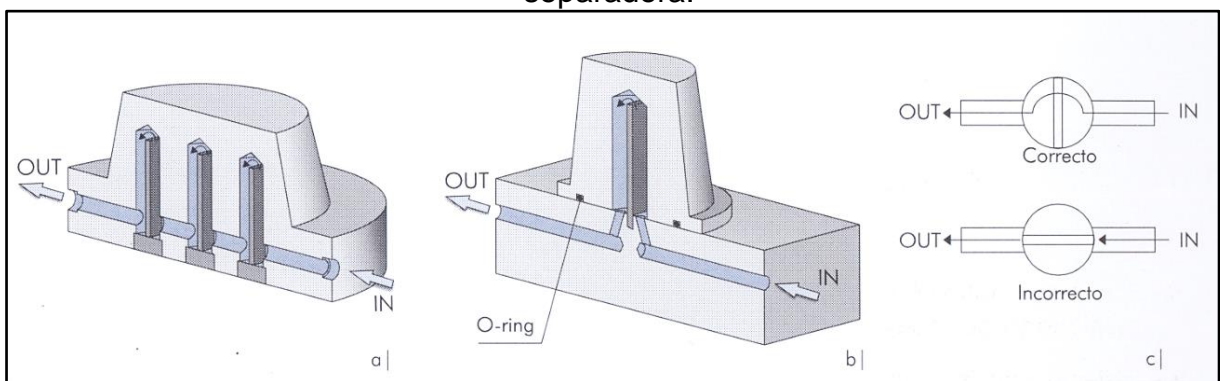
Fonte: Centimfe (2003, p.23).

Conforme apresentado na Figura 15, o fluido entra pelo tubo inferior e ao chegar ao fundo da furação retorna para fora do molde pelo tubo exterior que tem o diâmetro externo do furo. (CENTIMFE, 2003).

2.6.1.9 Circuito de Refrigeração por lâminas separadoras

O sistema de refrigeração utilizando canais *baffles*, proporciona outra forma de refrigerar as zonas profundas da cavidade, e com pouco falta de espaço para se utilizar o circuito *bubbler* com canal de retorno. A Figura 16 apresenta dois modos possíveis da aplicação do circuito *baffles*. (CENTIMFE, 2003).

Figura 16 – Sistemas de refrigeração *baffles* e posição de montagem da lâmina separadora.



Fonte: Centimfe (2003, p.23).

Neste sistema 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. (CENTIMFE, 2003).

Em alguns casos são utilizadas lâminas separadoras torcidas em espiral, o que as tornam mais eficientes devido a turbulência induzida no fluido. (CENTIMFE, 2003).

2.7 Simulação Computacional

A simulação computacional foi desenvolvida a partir de ferramentas CAE (do inglês *Computer Aided Engineering*) para modelar um problema real de acordo com as leis físicas que o descrevem. (HARADA, 2012).

Miranda (2017) descreve que para ser possível simular o processo de injeção, é necessário modelar matematicamente todos os fenômenos envolvidos no sistema, usualmente utilizando um conjunto de equações diferenciais. A solução numérica destas equações gera um conjunto de dados numéricos que devem posteriormente ser validados. A validação dos resultados pode ser realizada comparando os valores reais de processo e/ou experimentos.

De acordo com Harada (2012), a simulação computacional em projetos de moldes de injeção auxilia, desde a concepção do produto, adequando-o para o processo de moldagem por injeção. No desenvolvimento e manutenção do molde em geral, até a otimização do ciclo de moldagem da peça. Minimizando tanto erros de projeto de design do molde e possibilitando baratear os custos de desenvolvimento de novos produtos.

Levando em conta que as peças injetadas possuem geometria complexa, a probabilidade de geração de peça não conforme, seja por projeto do produto ou pelo molde, é muito elevada. Neste aspecto, a simulação é hoje uma alternativa viável e até necessária, já que o custo para resolver uma falha é muito menor na fase de projeto do que após a fabricação do molde. Mesmo na etapa de projeto do molde é possível diminuir muito o número de revisões do desenho com a utilização de simulações para o projeto.

2.7.1 Softwares Comerciais para Processo de Injeção de Plástico

Existem diversos pacotes comerciais que contêm ferramentas do tipo CAE capazes de realizar a simulação numérica do processo de injeção de plásticos. Os softwares *C-mold®*, *Moldex®* e o *Moldflow®* figuram entre os mais conhecidos e utilizados destes pacotes. (MIRANDA,2017).

Harada (2012) descreve que com auxílio dos softwares é possível elaborar e otimizar a disposição dos canais de injeção e sistema de refrigeração, obtendo condições e parâmetros de processo como temperatura do molde e da peça, velocidade de injeção, pressão, resultados de contração, entre outras variáveis.

Os seguintes benefícios são obtidos pelo uso destes softwares como ferramenta de simulação do processo de moldagem. HARADA (2012).

- Melhoria das propriedades do material injetado;
- Otimização da localização das entradas de injeção;
- Balanceamento de moldes múltiplas cavidade;
- Redução do tempo de ciclo de injeção;
- Otimização do perfil de injeção (velocidade/pressão);
- Localização e controle de linhas de emenda;
- Visualização e solução de problemas de empenamento;
- Determinação da localização de saídas de gases;
- Determinação de tensões residuais no processo de injeção;
- Otimização de circuitos de refrigeração;
- Redução do tempo de desenvolvimento do molde;
- Redução do número de *try-out* para liberar o molde;
- Eliminação de retrabalhos do ferramental.

2.7.2 Interpretação dos Resultados Obtidos em Softwares Comerciais

Segundo Harada (2012) programas como *Moldflow®* são modulares e podem fornecer ampla gama de resultados. A interpretação e o uso correto dos resultados de simulação para o diagnóstico de um problema é de fundamental importância. A qualidade dos resultados tem elevada dependência das condições de contornos aplicadas, dados do material injetado e do tratamento adequado do modelo

geométrico, antes e depois da geração da malha. Portanto, deve-se fazer uma análise adequada de todos os parâmetros e dos resultados para verificar se a simulação está de acordo com o processo real de injeção.

A seguir são apresentados uma descrição de alguns dos principais resultados obtidos em uma simulação de injeção feita no software *Moldflow*®.

- Tempo de Preenchimento: é o tempo necessário para o material preencher completamente a cavidade, incluindo o tempo de comutação. De maneira geral, o material deve chegar a todas as bordas da peça ao mesmo tempo, evitando efeitos prejudiciais como hesitação de fluxo e contrações diferenciadas. (HARADA, 2012).
- Distribuição de temperatura: indica a distribuição de temperatura da peça ao final do preenchimento do molde. É necessário evitar grandes diferenças de temperatura para não haver contração diferenciada e conseqüentemente empenamento da peça. Além disso, pontos muito frios podem causar o congelamento do material, podendo obstruir o preenchimento completo do molde. (HARADA, 2012).
- Taxa de cisalhamento: indica a intensidade em que o polímero fundido foi deformado. A definição de taxa de cisalhamento é a diferença de velocidade ente as camadas de escoamento do polímero fundido. Se em um ponto o material encontra-se parado, e num ponto vizinho há alta velocidade, então a taxa de cisalhamento nessa região é alta. Na prática, altos valores de taxa de cisalhamento resultam em degradação do material e surgimento de manchas. No caso do PP, valores de até $100000\ s^{-1}$ são adequadas, porém acima disso pode haver queima. Geralmente os valores máximos de taxa de cisalhamento ocorrem nos pontos de injeção devido à sua pequena dimensão. (HARADA, 2012).
- Tensão residual: Segundo Miranda (2017) apud Strong (2005), quando um polímero é submetido a altas pressões e temperaturas de injeção, estas condições geram elevadas tensões resultantes da fricção entre as camadas de material que escoam, conhecidos como tensões residuais. As tensões residuais são decorrentes de acomodamento desordenado das macromoléculas em um espaço determinado, o que reduz as propriedades físico-mecânicas, térmicas e químicas, tendendo a atrapalhar inicialmente o

escoamento, fazendo uma força contrária à frente de fluxo. Essas tensões também ocorrem quando as paredes internas da cavidade do molde estão com temperaturas próximas as da massa polimérica. Se a peça for resfriada sem que haja a redução dessas tensões, gera-se tensões residuais, aumentando a fragilidade da peça. (HARADA, 2012).

- Contração volumétrica: indica valores de contração volumétrica em cada ponto da peça. (HARADA, 2012). Rechupes ocorrem em regiões onde a contração do material não pode ser compensada de alguma maneira, mais especificamente em locais onde as espessuras ou ressaltos são elevados resultando em maior tempo para perda de calor. (SACCHELLI, 2002).

3 METODOLOGIA

A simulação computacional empregada neste trabalho, utilizou o software *Moldflow®*. Pelo sequenciamento de análises de preenchimento, resfriamento, preenchimento, empacotamento e empenamento (*Fill+Cool+Fill+Pack+Warp*), permitindo obter resultados de empenamento e resfriamento da peça. Para melhor entender as influências do sistema de refrigeração no processo, foram realizadas as seguintes variações em 6 parâmetros de entrada do experimento:

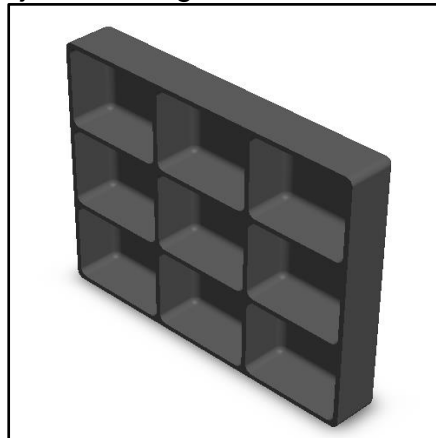
1. Material a ser injetado (ABS, PP, POM e PA6);
2. Circuito de refrigeração em série e com canais secundários;
3. Posição dos canais secundários utilizando lâminas separadoras (*baffles*);
4. Distância entre os canais e a peça;
5. Profundidade das cavidades da peça;
6. Diâmetro e distância entre os canais secundários de refrigeração.

3.1 Geometria para simulação

A geometria utilizada para as simulações foi uma caixa dividida em nove compartimentos mostrada na Figura 17 e Figura 18. As dimensões do produto são 130 mm de largura, 110 mm de altura, 20 mm de profundidade e com 2 mm de espessura de parede. Com estas dimensões cada compartimento ficou com 18mm de profundidade.

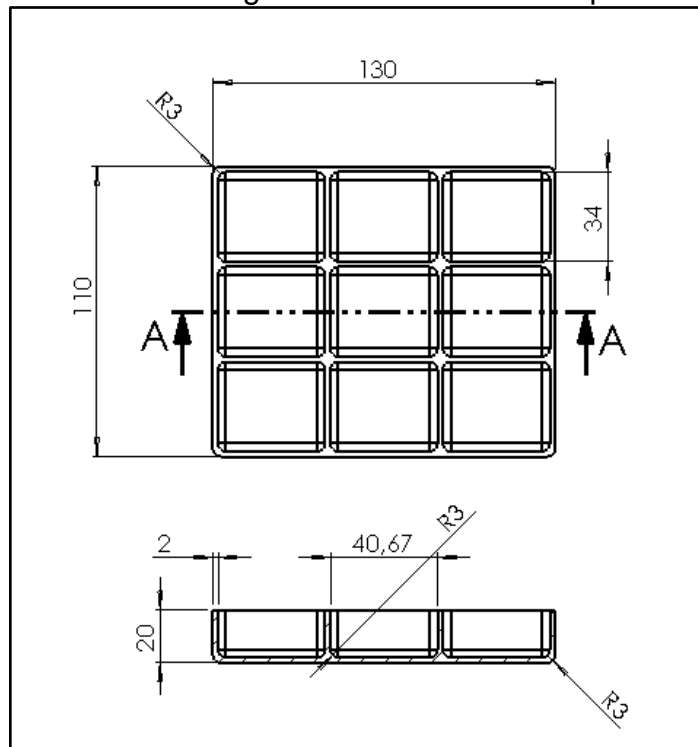
Para avaliar a influência da profundidade dos compartimentos da peça no tempo de ciclo, foram avaliadas três profundidades, 20 mm, 40 mm e 60 mm com as demais dimensões idênticas a geometria apresentada na Figura 18.

Figura 17 – Projeto 3D da geometria utilizada na simulação.



Fonte: Berner (2016, p. 40).

Figura 18 – Desenho técnico da geometria utilizada com profundidade de 20 mm.



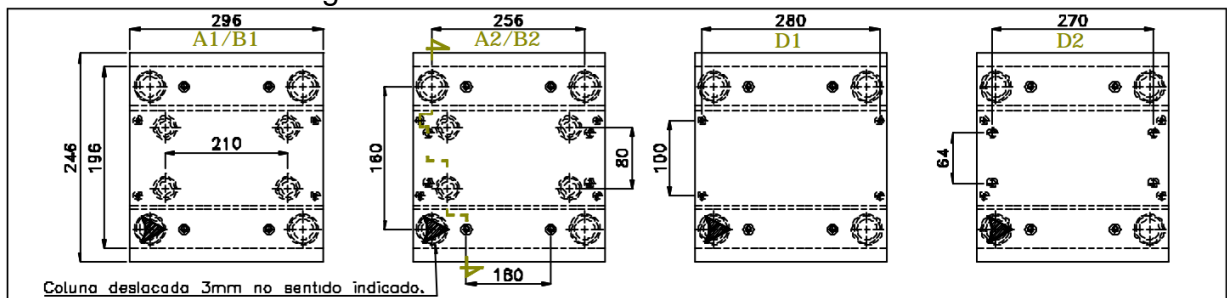
Fonte: Berner (2016, p. 41).

As geometrias foram desenhadas em um programa CAD e então importadas ao *Moldflow*® em formato STL. Para criação de malha foram utilizados elementos triangulares e média de *aspect ratio* de 7. Com isso, obteve-se na geometria com profundidade de 20 mm, 2989 nós e 5974 elementos triangulares. Para a profundidade de 40 mm, obteve-se 5361 nós e 9201 elementos triangulares enquanto para profundidade de 60 mm, obteve-se 6506 nós e 11744 elementos triangulares.

3.2 Porta molde

Para identificar a localização do molde na peça bem como os canais de injeção, são necessárias as dimensões do porta molde que será utilizado. Para este estudo, o porta molde utilizado para fins de projeto é da marca MDL, apresentado na Figura 19 com medidas externas de 296 mm x 246 mm x 325 mm e tendo as placas cavidades com dimensões de 174 mm x 154 mm e 60 mm de espessura.

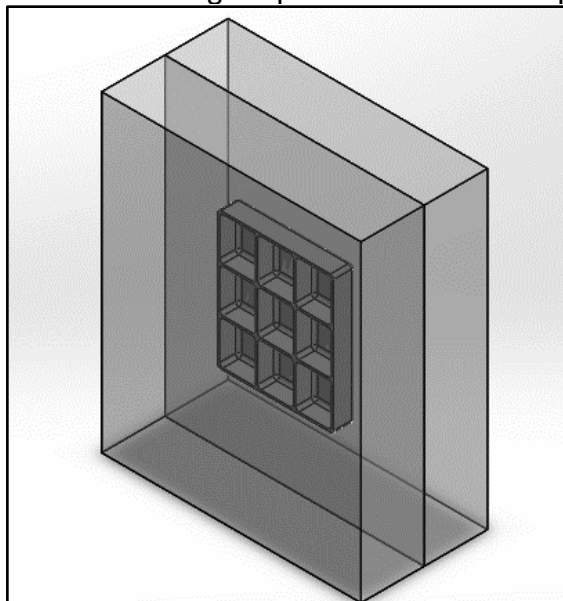
Figura 19 – Porta Molde MDL modelo 25.30.



Fonte: MDL (2016, p.13).

Para que a peça fique no molde móvel no momento da abertura do molde para extração, a peça fica localizada entre as duas cavidades, com 18 mm da peça no molde móvel e 2 mm no molde fixo, conforme exibido na Figura 20. Com isso, o canal de injeção é a espessura da cavidade fixa menos 2 mm, ou seja, 58 mm.

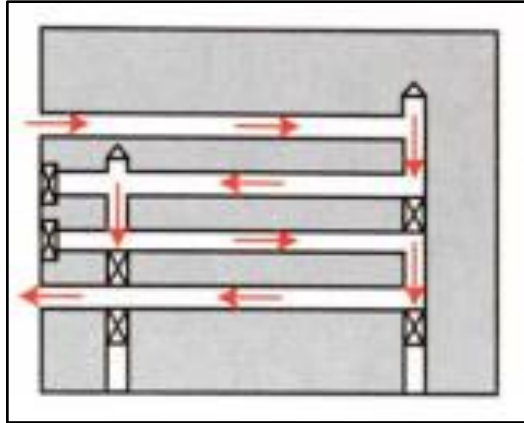
Figura 20 – Montagem placas cavidades e peça.



Fonte: Berner (2016, p.42).

De acordo com Berner (2016), os canais de refrigeração em série têm maior eficiência do que os canais de refrigeração em paralelo para a refrigeração desta peça, já que apresentam melhor fluxo de água, logo, todas as simulações deste estudo serão utilizando canais principais de refrigeração em série. A Figura 21 retrata a configuração de um circuito em série adotada.

Figura 21 – Configuração de um sistema de refrigeração em série.



Fonte: Berner (2016, p.45).

No circuito em série, o fluido deve percorrer um único caminho do começo ao fim do circuito com velocidade e vazão constante ao longo do canal.

3.3 Materiais poliméricos utilizados

Os materiais que serão utilizados foram escolhidos devido à grande aplicação no setor automotivo conforme descrito por Swift (2016), e por apresentarem diversas características importantes para o ciclo de injeção. Esses materiais são o nylon (PA6) Technyl C216 da Rhodia, o polioximetileno (POM) Celcom M90 da Ticona, o polipropileno (PP) H105 da Braskem e o Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) Terluran GP-22 da BASF. As principais características relevantes para injeção são descritas na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades físicas e térmicas dos termoplásticos utilizados.

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

Fonte: Biblioteca Moldflow® (2013).

Com a finalidade 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. Os parâmetros de entrada necessários de cada material para as análises no software são descritos na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros de entrada da simulação.

Condições da análise	PA 6	POM	ABS	PP
Temperatura de Injeção (°C)	260	180	230	230
Temperatura de Ejeção (°C)	170	130	93	110
Temperatura do Molde (°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

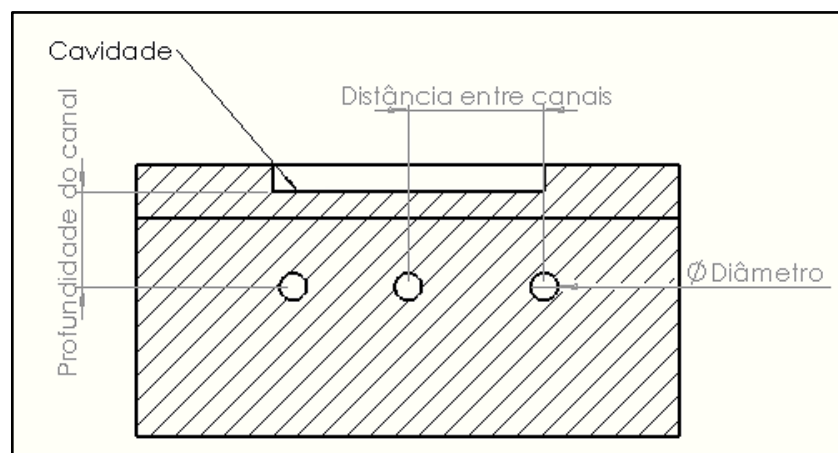
Fonte: O autor (2017).

3.4 Definição dos sistemas de refrigeração

Em sequência do estudo realizado por Berner (2016), inicialmente, as proposições dos sistemas de refrigeração utilizou-se 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.

Este estudo avaliou a variação do diâmetro do canal, distância entre os canais e profundidades em relação a cavidade, conforme apresentado na Figura 22, proposto por Berner (2016).

Figura 22 – Parâmetros propostos para variação do sistema de refrigeração.



Fonte: Berner (2016, p.47).

Os diâmetros dos canais de refrigeração utilizados na simulação foram 8 mm e 10 mm, as distâncias entre os canais e profundidade do canal foram baseadas no diâmetro do canal. Logo, as profundidades empregadas foram 1, 2 e 3 vezes o diâmetro e as distâncias entre os canais serão 2,5, 5 e 8 vezes o diâmetro, apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – 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, p.47).

Os casos foram simulados para os materiais PA6 e POM e então comparados as simulações aplicadas por Berner (2016), aos termoplásticos PP e ABS, verificando as dimensões mais apropriadas para a refrigeração.

Após identificar a melhor configuração do sistema de refrigeração em série para os materiais, foi proposto adicionar canais secundários no interior das cavidades da caixa simulada para reduzir o tempo de ciclo e para que o perfil de temperatura e resfriamento seja mais homogêneo em todas as superfícies.

Os canais secundários aplicados foram canais *baffles* para aumentar a troca térmica no interior das 9 cavidades. Para manter o mesmo fluxo em todo o sistema, e já que a lâmina separadora divide a área do canal secundário em duas partes, a análise foi feita com diâmetro para os canais *baffles*, equivalente a duas vezes a área do canal principal. A profundidade aplicada foi de 20 mm, 40 mm, e 60 mm a partir do canal primário, para as respectivas geometrias, afim de manter a mesma distância dos canais com a peça que os canais primários.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta primeiramente os resultados das simulações efetuadas para canais de refrigeração em série dos materiais descritos na metodologia. Em seguida, são apresentados os resultados utilizando canais de refrigeração secundários, e por fim verifica-se a influência da profundidade das cavidades da peça simulada.

Em todos os casos, avaliou-se o tempo de ciclo, temperatura média e contração da peça injetada, com objetivo principal na redução do tempo de ciclo.

4.1 Circuito em Série para geometria com profundidade de 20 mm

A Tabela 5 e Tabela 6 demonstram os valores obtidos de tempo de ciclo, temperatura média e porcentagem de contração das simulações realizadas para os materiais PA6 e POM, variando a quantidade e distância entre canais, além da profundidade do canal até a cavidade do molde. Em negrito são apresentadas as melhores configurações em relação ao tempo de ciclo, temperatura média e porcentagem de contração do material para os canais com diâmetro de 8 mm e 10 mm.

Tabela 5 – Resultados das simulações para PA6.

Diâmetro (mm)	Entre canais (mm)	Quantidade de 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

Tabela 5 – Resultados das simulações para PA6. (Continuação).

Diâmetro (mm)	Entre canais (mm)	Quantidade de canais	Profundidade (mm)	Tempo de ciclo (s)	Temperatura média (°C)	Contração (%)
10	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
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

Fonte: O autor (2017).

Tabela 6 – Resultados das simulações para POM.

Diâmetro (mm)	Entre canais (mm)	Quantidade de 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

Tabela 6 – Resultados das simulações para POM. (Continuação)

Diâmetro (mm)	Entre canais (mm)	Quantidade de canais	Profundidade (mm)	Tempo de ciclo (s)	Temperatura média (°C)	Contração (%)
8	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

Fonte: O autor (2017).

Portanto, verifica-se que 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 nesta configuração. Com isso, a Tabela 7 apresenta o tempo de ciclo, temperatura média e contração para os quatro termoplásticos em estudo na configuração de sistema de refrigeração em série.

Tabela 7 – Resultados com menor tempo de ciclo para os quatro termoplásticos 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

Fonte: O autor (2017).

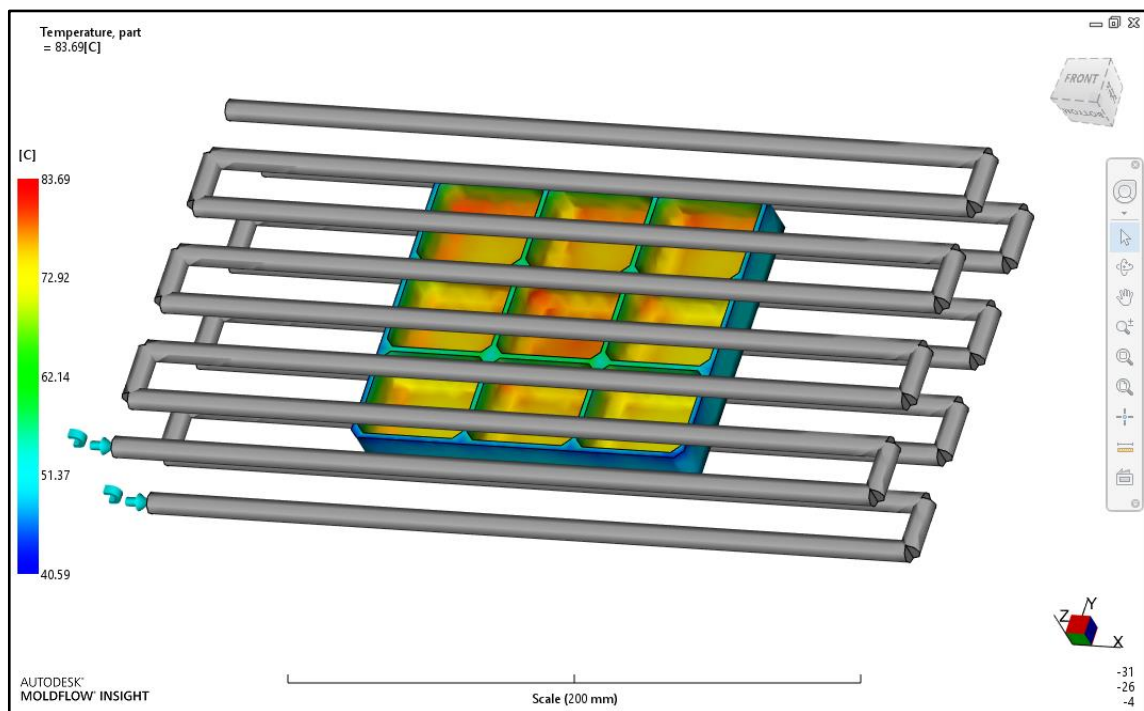
É possível verificar que a escolha do material utilizado para injeção tem grande influência no tempo de ciclo. Esta diferença do tempo de ciclo, temperatura média e contração dos materiais é proveniente das diferentes propriedades físicas e térmicas dos termoplásticos, apresentados na Tabela 2, e dos parâmetros de injeção utilizados para cada material, apresentados na Tabela 3.

Os principais fatores são a condutividade térmica e as diferenças entre as temperaturas de injeção e ejeção para cada tipo de termoplástico, além da temperatura do molde que impacta diretamente na troca térmica.

Verifica-se que os termoplásticos POM e PA6 tem uma diferença muito menor da temperatura de injeção para a temperatura de ejeção, além de possuírem maiores condutividades térmicas, tornando o tempo de resfriamento necessário muito menor do que comparado aos termoplásticos ABS e PP. Tal fato, impacta também na temperatura média de extração, já que o POM e PA6 podem ser ejetadas com temperaturas mais elevadas.

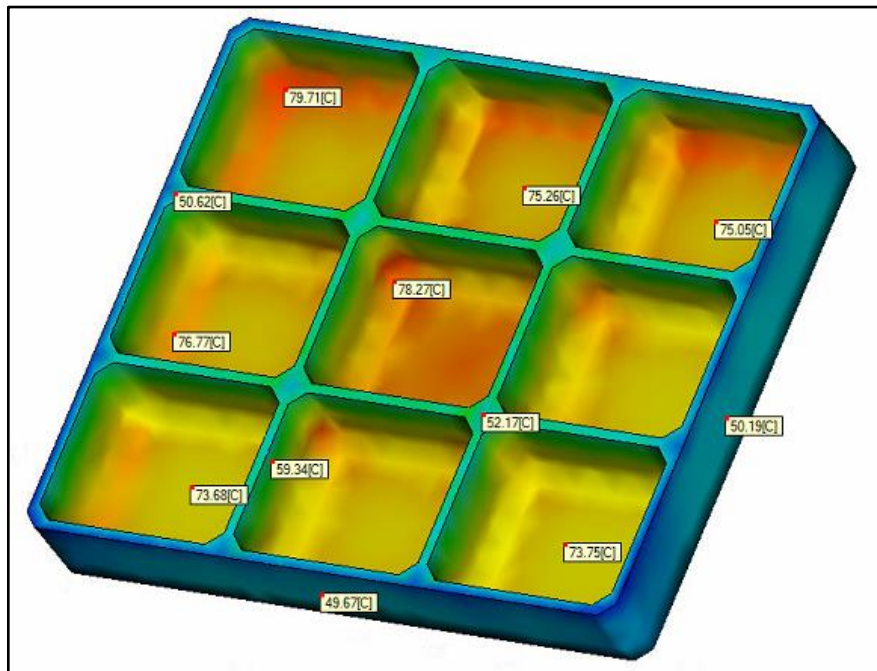
A Figura 23 exhibe de maneira mais clara o perfil de temperatura da peça para o material PA6 e a geometria do sistema de refrigeração em série de menor tempo de ciclo. Enquanto a Figura 24, apresenta alguns valores de temperatura ao longo da peça antes da extração.

Figura 23 – Simulação do sistema em série com menor tempo de ciclo para o PA6.



Fonte: O autor (2017).

Figura 24 – Perfil de temperatura da peça em PA6 após resfriamento sem baffles.



Fonte: O autor (2017).

Percebe-se que nas superfícies internas das cavidades, as temperaturas são maiores devido a maior distância entre os canais de refrigeração e estas superfícies. Esta ineficiência de troca térmica nas cavidades é responsável pelo acréscimo no tempo de refrigeração e por consequência aumento no tempo de cada ciclo.

4.2 Comparação do sistema de refrigeração do circuito em série e com canais baffles para geometria com profundidade de 20 mm

Após avaliar o melhor circuito de refrigeração em série, foram analisados os sistemas de refrigeração com canais secundários, visando reduzir a temperatura interna das cavidades da peça, diminuindo o tempo de ciclo. Os canais secundários aplicados foram os circuitos *baffles* um dos métodos usualmente aplicados para refrigeração em cavidades conforme apresentado no referencial teórico sobre os sistemas de refrigeração.

Os resultados obtidos utilizando canais secundários para a geometria com profundidade de 20mm é apresentada na Tabela 8, comparando os resultados com o circuito em série, para os quatro materiais em estudo.

Tabela 8 – 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 (%)
S/ Baffles	18,6	56,9	5,5
Com Baffles	18,6	49,7	5,4

PA6	Tempo de ciclo (s)	Temperatura média (°C)	Contração (%)
S/ Baffles	22	62,1	5,6
Com Baffles	17,3	57,8	5,6

ABS	Tempo de ciclo (s)	Temperatura média (°C)	Contração (%)
S/ Baffles	51,7	36,7	2,3
Com Baffles	45,6	34,3	2,3

PP	Tempo de ciclo (s)	Temperatura média (°C)	Contração (%)
S/ Baffles	51,8	38,1	11
Com Baffles	45,2	35,5	10,9

Fonte: O autor (2017).

Analisando o tempo de ciclo, a utilização do sistema *baffles* para a peça com profundidade de 20 mm, possibilita uma redução no ciclo para o PA6 de 21,36%, para o PP de 12,74% e para o ABS de 11,79%, apenas para o material POM não houve redução.

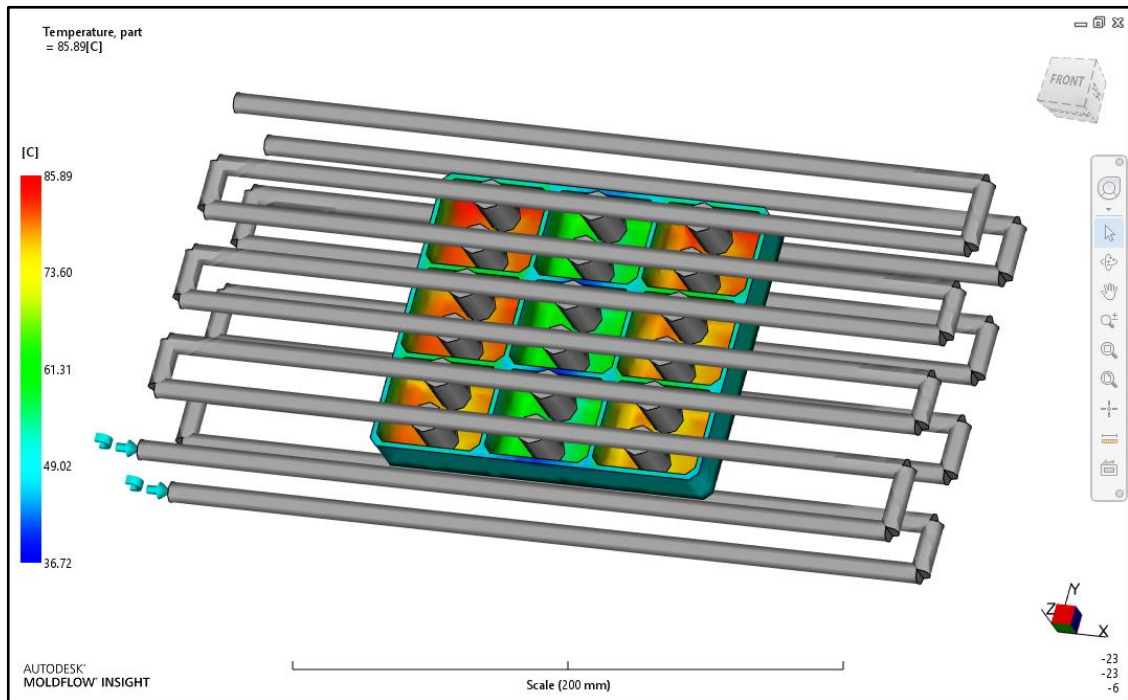
Além do tempo de ciclo, as temperaturas médias da peça diminuíram quando aplicado os canais *baffles*, decorrente de uma refrigeração mais eficiente nas superfícies internas das cavidades, reduzindo a temperatura média da peça. Isto indica que possivelmente a qualidade superficial do produto injetado é superior, pois obtiveram maior homogeneidade que resulta em menores distorções e possibilidade do aparecimento de defeitos no produto real.

Observamos desta maneira que dependendo do material utilizado e da profundidade da peça, o tempo de redução de ciclo pode ser considerável.

A Figura 25 exibe o perfil de temperatura da peça para o material PA6 utilizando a geometria do sistema de refrigeração em série com os canais *baffles*.

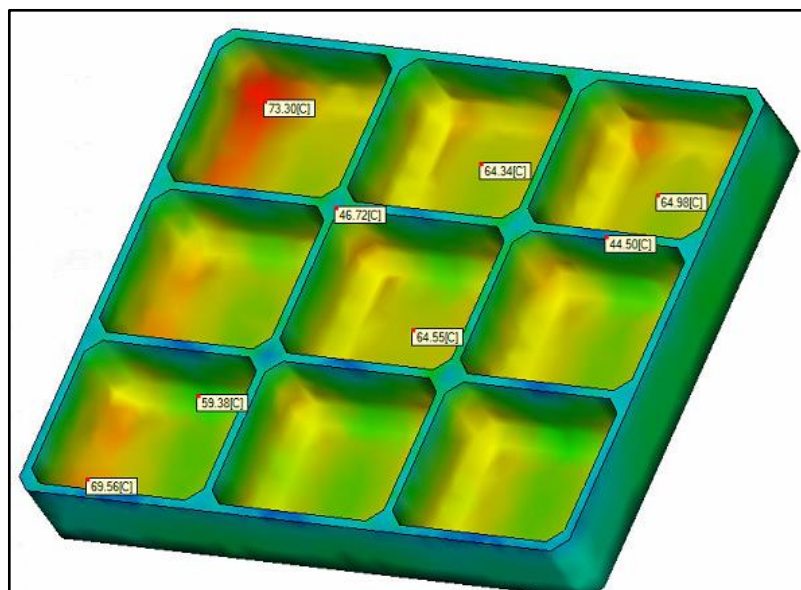
Enquanto a Figura 26 apresenta alguns valores de temperatura ao longo da peça antes da extração.

Figura 25 – Sistema de refrigeração em série com canais *baffles* no interior das cavidades para o PA6.



Fonte: O autor (2017).

Figura 26 – Perfil de temperatura da peça em PA6 após resfriamento com canais *baffles*.



Fonte: O autor (2017).

Comparando a Figura 26 com a Figura 24, percebe-se que nas superfícies internas das nove cavidades, a temperatura diminuiu cerca de 8°C com a utilização de canais *baffles*, fato que comprova a melhor refrigeração nestas superfícies.

4.3 Comparação do sistema de refrigeração do circuito em série e com canais *baffles* para geometria com profundidade de 40 mm e 60 mm

Após identificado que a aplicação de canais secundários para injeção da peça com profundidade de 20 mm, permitiu reduzir o tempo de ciclo para três dos quatro materiais estudados. Foi analisada qual a influência da profundidade da peça no tempo de ciclo utilizando o circuito em série, e qual a redução do tempo de ciclo que pode ser obtida ao aplicar canais *baffles*.

As simulações realizadas foram para as geometrias com profundidades de 40 mm e 60 mm. Os posicionamentos dos canais *baffles* aplicados foram os mesmos das análises anteriores, mantendo a distância entre o canal e a cavidade de 8 mm para a profundidade dos canais.

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos para a peça de profundidade 40 mm utilizando os 4 materiais.

Tabela 9 – Resultados obtidos para peça com profundidade 40mm.

POM	Tempo de ciclo (s)	Temperatura média (°C)	Contração (%)
S/ Baffles	30,9	62,8	6,8
Com Baffles	19,1	53,7	7,0

PA6	Tempo de ciclo (s)	Temperatura média (°C)	Contração (%)
S/ Baffles	41,0	65,5	6,6
Com Baffles	24,8	56,0	6,6

ABS	Tempo de ciclo (s)	Temperatura média (°C)	Contração (%)
S/ Baffles	73,7	40,9	3,0
Com Baffles	53,9	34,9	3,1

Tabela 9 – Resultados obtidos para peça com profundidade 40mm. (Continuação)

PP	Tempo de ciclo (s)	Temperatura média (°C)	Contração (%)
S/ Baffles	76,8	42,2	11,3
Com Baffles	55,3	35,9	11,7

Fonte: O autor (2017).

Percebe-se que com o aumento da profundidade da peça para 40mm, a aplicação de canais secundários obtém uma redução do tempo de ciclo significativa, tendo uma redução de 38,2% no tempo de ciclo para o material POM, 39,5% de redução para o PA6, 26,9% para o ABS e 28% para o PP.

Ao simular a peça com profundidade de 60 mm, a aplicação de canais secundários tem um impacto ainda maior na redução do tempo de ciclo, conforme exibe a Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados obtidos para peça com profundidade 60 mm.

POM	Tempo de ciclo (s)	Temperatura média (°C)	Contração (%)
S/ Baffles	46,9	64,6	6,5
Com Baffles	24,2	50,6	6,7

PA6	Tempo de ciclo (s)	Temperatura média (°C)	Contração (%)
S/ Baffles	73,1	63,3	6,5
Com Baffles	31,9	51,6	6,5

ABS	Tempo de ciclo (s)	Temperatura média (°C)	Contração (%)
S/ Baffles	121,1	41,3	2,9
Com Baffles	60,0	34,3	2,9

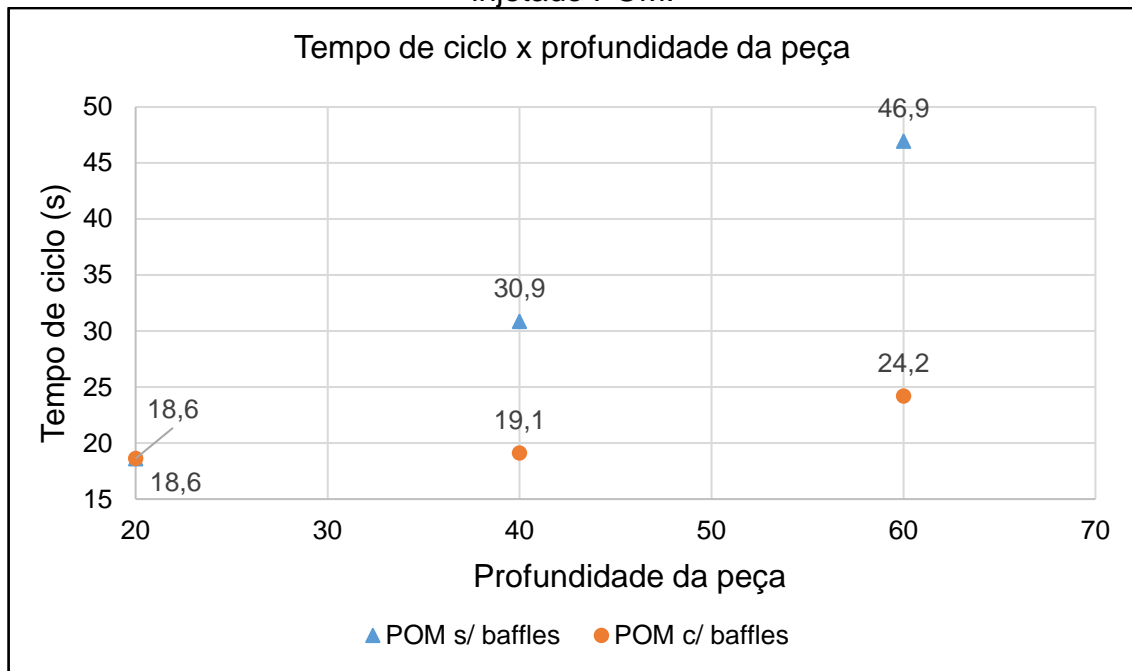
PP	Tempo de ciclo (s)	Temperatura média (°C)	Contração (%)
S/ Baffles	140,8	41,3	11,8
Com Baffles	64,3	34,8	11,7

Fonte: O autor (2017).

Para os resultados de injeção com profundidade da peça de 60mm, a aplicação de canais secundários obtém uma redução do tempo de ciclo para o POM de 48,4%, 56,4% de redução para o PA, 50,4% para o ABS e 54,3% para o PP.

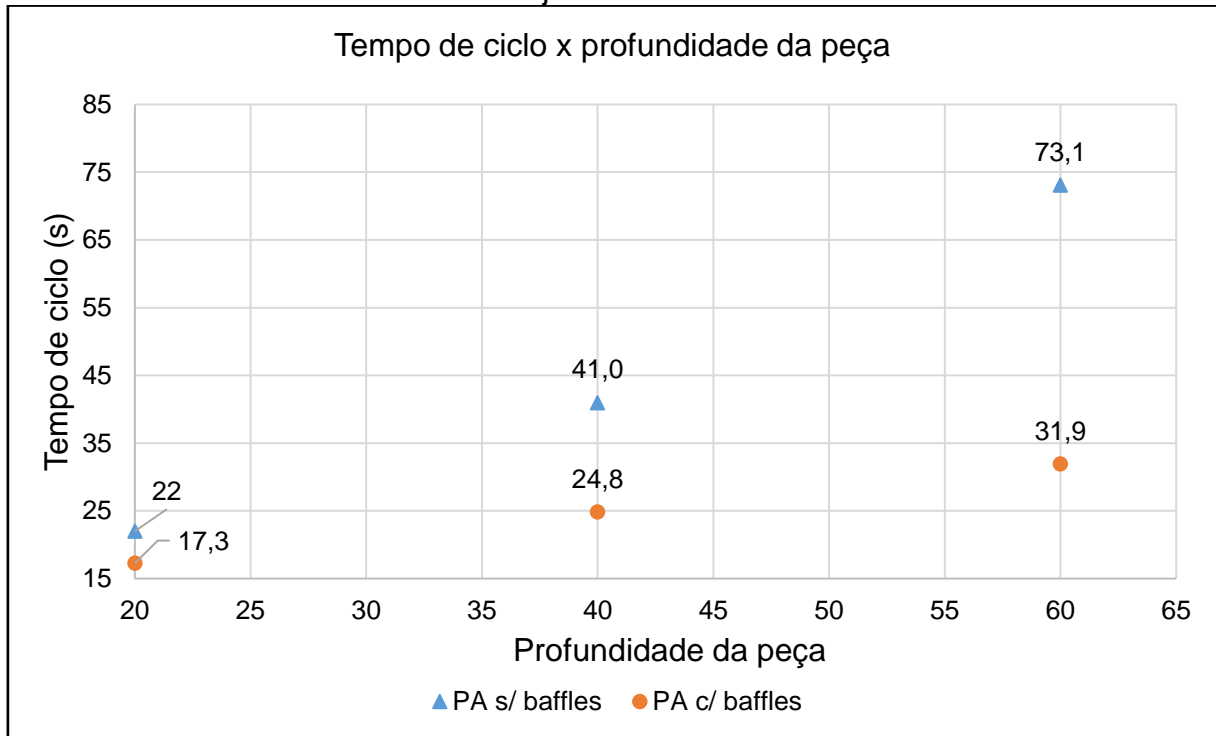
Os gráficos 4,5,6 e 7 apresentam a relação entre a profundidade e tempo de ciclo, para os canais em série sem *baffles* e para canais em série com *baffles* para os quatro materiais avaliados.

Gráfico 4 – Tempo de ciclo em função da profundidade da peça para o termoplástico injetado POM.



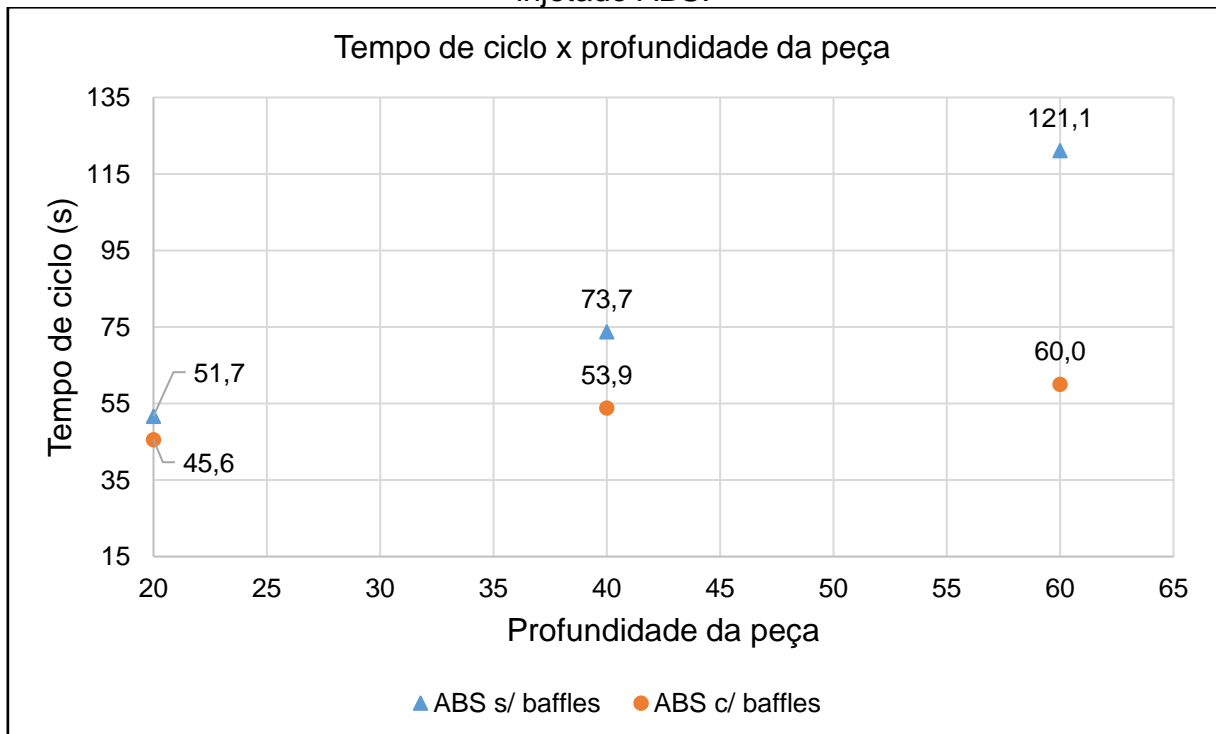
Fonte: O autor (2017).

Gráfico 5 – Tempo de ciclo em função da profundidade da peça para o termoplástico injetado PA6.



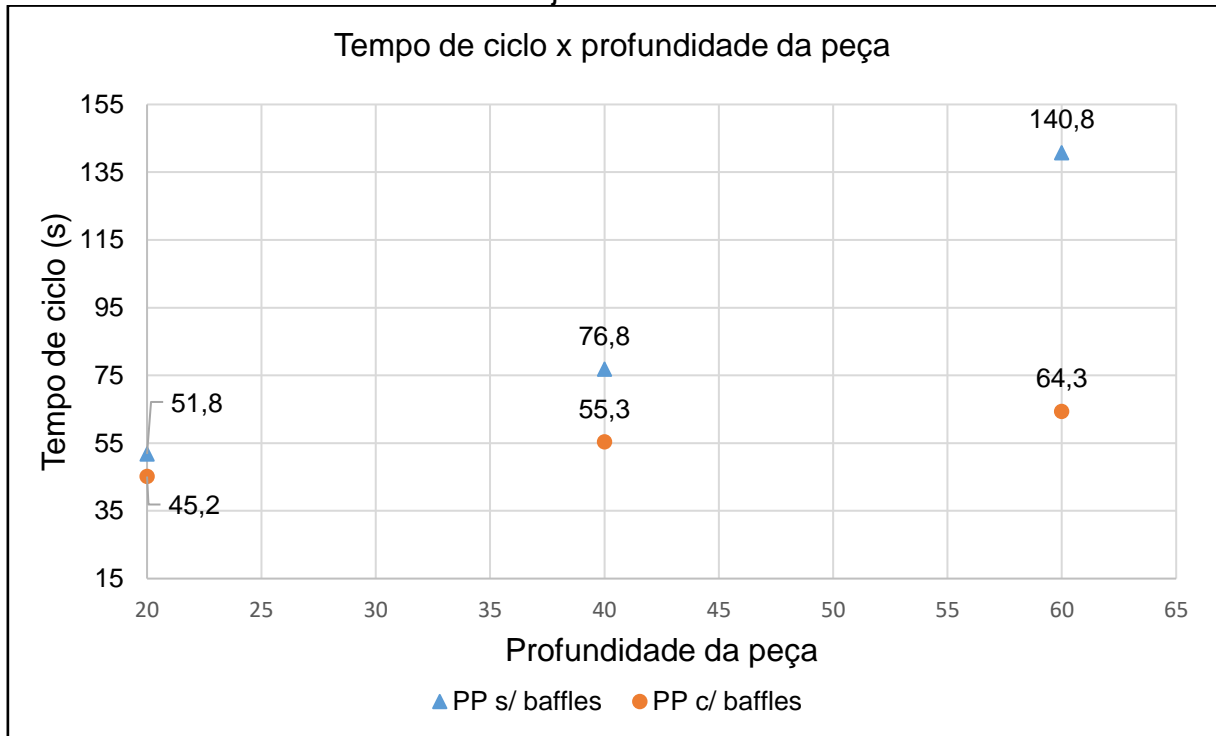
Fonte: O autor (2017).

Gráfico 6 – Tempo de ciclo em função da profundidade da peça para o termoplástico injetado ABS.



Fonte: O autor (2017).

Gráfico 7 – Tempo de ciclo em função da profundidade da peça para o termoplástico injetado PP.



Fonte: O autor (2017).

Pode-se verificar que para todos os materiais avaliados, o tempo de ciclo tem acréscimo significativo com o aumento da profundidade da peça, sem aplicar canais secundários de refrigeração. Os gráficos apresentam claramente a variação do tempo de ciclo entre o canal sem canais *baffles* e um sistema de refrigeração com *baffles*, para pequenas profundidades a aplicação de canais *baffles* tem menor impacto do que para grandes profundidades. Portanto, a profundidade da peça é um parâmetro importante para avaliar se a aplicação dos canais *baffles* é viável para determinada geometria a ser injetada.

Verifica-se que a redução do tempo de ciclo aplicando canais *baffles* para a profundidade de 20 mm foi bem menor do que para as profundidades 40mm e 60mm. Deve-se avaliar no projeto de fabricação do molde se o custo adicional para fabricação do ferramental com canais secundários vale a pena, já que a fabricação é mais complexa e demorada ao comparar com apenas canais de refrigeração primários em série. Para isso, deve-se levar em conta a qualidade do produto e as necessidades do processo, visando maior produtividade.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho tratou da otimização do sistema de refrigeração em moldes de injeção, ao abordar a importância na redução do tempo de resfriamento para o aumento da produtividade. Essa redução do tempo de ciclo é necessária devido a expansão do uso de termoplásticos no setor automotivo.

O objetivo principal foi analisar diversos sistemas de refrigeração e propor um sistema de melhor eficiência visando diminuir o tempo de resfriamento, por meio de simulação numérica. Os objetivos específicos foram analisar alguns parâmetros de injeção, verificar a influência dos canais secundários, avaliar a diferença de tempo de ciclo para diferentes termoplásticos, além de verificar a influência da profundidade das cavidades no tempo de ciclo de injeção.

De acordo com os resultados, foi possível otimizar o tempo de ciclo de injeção para os quatro materiais estudados, alterando apenas as configurações do sistema de refrigeração.

O melhor sistema de refrigeração proposto, foi o sistema com 8 canais principais em série, com diâmetro de canal e profundidade de 8 mm, distância entre os canais de 20 mm, além de utilizar canais secundários *baffles* com diâmetro de 12 mm, mantendo a distância entre a cavidade do molde e a refrigeração de 8 mm.

Ao analisar apenas a configuração com sistema de refrigeração primário, a melhor configuração a geometria foi o sistema com 8 canais principais em série, com diâmetro de canal e profundidade de 8mm, distância entre os canais de 20 mm. Nesta configuração os menores tempos de ciclos obtidos foram de 18,6s para o POM, 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 51,7s para o ABS e 51,8 para o PP. Ou seja, 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.

As análises demonstraram que é importante escolher atentamente o material termoplástico para o componente desejado. Além de avaliar as propriedades

mecânicas, custo do termoplástico e funcionalidades, é imprescindível levar em consideração o tempo de ciclo do processo.

Ao comparar o melhor sistema proposto com o sistema em série otimizado, verifica-se que ao aplicar os *baffles*, para a geometria avaliada, com profundidade de 20 mm, foi possível reduzir aproximadamente 17,5% do tempo de ciclo para o PA6, 11,7% para o ABS, 12,7% para o PP e 0% para o POM. Para profundidade de 40 mm a redução foi de aproximadamente 39,5% para o PA6, 26,9% para o ABS, 28% para o PP e 38,1% para o POM. Para a profundidade de 60 mm a redução foi de aproximadamente 56,4% para o PA6, 50,4% para o ABS, 54,3% para o PP e 48,4% para o POM.

Assim, verifica-se que para pequenas profundidades a aplicação de canais *baffles* tem menor impacto do que para grandes profundidades. Portanto, a profundidade da peça é um parâmetro importante para avaliar se a aplicação dos canais *baffles* é viável para determinada geometria a ser injetada.

Como a aplicação de sistemas com canais secundários deve ser analisada comparando a redução do tempo de ciclo com o custo de fabricação adicional proveniente da maior complexidade do molde para cada projeto de molde.

Sugere-se como pesquisas futuras comparar o custo de fabricação dos moldes apenas com canais primários em série e do sistema com canais *baffles*, para as geometrias estudadas, afim de avaliar a partir de qual profundidade é viável utilizar canais *baffles* de acordo com o custo de fabricação dos moldes.

REFERÊNCIAS

ADIPAST. **Acrilonitrila butadieno estireno (ABS)**. Disponível em: <http://www.adiplast.ind.br/news_abs.php>. Acesso em: 14 set. 2017.

BERNER, J. A.. **Análise e melhoria do sistema de refrigeração em materiais plásticos**. 2016. 65 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Automotiva, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.

CADGURU (Org.). **A importância e os conceitos dos Moldes de Injeção para Termoplástico**. Disponível em: <<http://cad.cursosguru.com.br/novidades/a-importancia-e-os-conceitos-dos-moldes-de-injecao-para-termoplastico/>>. Acesso em: 06 out. 2016.

CTB. **Plásticos**. Disponível em: <https://ctborracha.com/?page_id=877>. Acesso em: 20 ago. 2017.

DIMLA, D. E.; CAMILOTTO, M.; MIANI, F. Design and optimisation of conformal cooling channels in injection moulding tools. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 164–165, p. 1294–1300, 2005.

HARADA, J. **Moldes para injeção de termoplásticos: projetos e princípios básicos**. São Paulo: Artliber, 2004. 308 p.

HARADA, J.; UEKI, M. M. **Injeção de termoplásticos: produtividade com qualidade**. São Paulo: Artliber, 2012. 269 p.

KITAYAMA, S.; MIYAKAWA, H.; TAKANO, M.; AIBA, S. Multi-objective optimization of injection molding process parameters for short cycle time and warpage reduction using conformal cooling channel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-8904-x>>. Acessado em: 28 ago.2016.

MANRICH, S. **Processamento de termoplásticos: rosca única, extrusão, matrizes, injeção e moldes**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2013. 485 p.

MDL (Org.). **Catálogo porta-moldes MDL**. Disponível em: <<http://www.mdl->

brasil.com.br/wp-content/uploads/Cat%C3%A1logo-Porta-moldes-MDL.pdf>.
Acessado em: 18 out.2016.

MIRANDA, Diego Alves de. **Estudo Experimental e de Simulação Computacional para Análise e Melhoria da Eficiência de um Molde de Injeção de Termoplásticos**. 2017. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Processos e Tecnologias Limpas, Universidade da Região de Joinville, Joinville, 2017.

MORASSI, Odair José. **Polímeros termoplásticos, termofixos e elastômeros**. São Paulo, 2013. Color. Disponível em: <http://www.crq4.org.br/sms/files/file/apostila_polimeros_0910082013_site.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2017.

SWIFT, T.K.; **Plastics and polymer composites in light vehicles**. **American Chemistry Council**, p. 1–19, july. 2016. Disponível em: <<https://www.plastics-car.com/lightvehiclereport>>. Acesso em: 28 ago.2017.

SZETEIOVÁ, K. **Automotive materials plastics in automotive markets today**. Bratislava, p. 27–33, 2010. Disponível em: <http://www.mf.stuba.sk/docs/internetovy_casopis/2010/3/szeteiova.pdf>. Acesso em: 23 ago.2016.