

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA QUÍMICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

MARIANA BARBOSA ANDRÉ DE SOUZA

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE DIFERENTES GEOMETRIAS DE CANAIS
DE REFRIGERAÇÃO DO MOLDE NO PROCESSO DE INJEÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II

PONTA GROSSA

2020

MARIANA BARBOSA ANDRÉ DE SOUZA

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE DIFERENTES GEOMETRIAS DE CANAIS
DE REFRIGERAÇÃO DO MOLDE NO PROCESSO DE INJEÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito a obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Química,
do Departamento de Engenharia Química,
da Universidade Tecnológica Federal do
Paraná.

Orientador: Prof^ª. Dr^ª. Juliana de Paula
Martins



PONTA GROSSA

2020



Ministério da Educação

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Câmpus Ponta Grossa

Curso de Engenharia Química



TERMO DE APROVAÇÃO

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE DIFERENTES GEOMETRIAS DE CANAIS DE REFRIGERAÇÃO DO MOLDE NO PROCESSO DE INJEÇÃO

por

Mariana Barbosa André de Souza

Monografia apresentada no dia 16 de novembro de 2020 ao Curso de Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Ponta Grossa. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado (aprovado, aprovado com restrições ou reprovado).

Profa. Ma. Heliety Rodrigues Borges Barreto
(UTFPR)

Profa. Ma. Sandra Mara Kaminski Tramontin
(UTFPR)

Profa. Dra. Juliana de Paula Martins
(UTFPR)
Orientadora

Profa. Dra. Juliana de Paula Martins
Responsável pelo TCC do Curso de Engenharia Química

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso

AGRADECIMENTOS

Primeiramente ao meu pai e à minha família por sempre me apoiar e incentivar, dando forças para encarar todas as etapas e obstáculos durante todos esses anos.

Ao meu companheiro de jornada, Marcelo, por estar comigo em todos os momentos, desde o início, segurando minha mão e estando sempre pronto a me ajudar ou simplesmente me ouvir.

A todos os meus amigos que sempre estiveram dispostos a me oferecerem conselhos e um ombro amigo. Em especial à minha amiga Beatriz que desde de antes dessa jornada sempre me incentivou e esteve presente, mesmo que nem sempre fisicamente.

À minha orientadora Prof^a. Dr.^a. Juliana de Paula Martins pela orientação para realização deste trabalho e por todo conhecimento compartilhado durante a graduação.

Agradeço a todos os professores do curso de Engenharia Química que passaram seus conhecimentos ano após ano.

A todos que contribuíram de forma direta e indireta na minha formação como profissional e também pessoal.

RESUMO

DE SOUZA, Mariana Barbosa André. **Simulação computacional de diferentes geometrias de canais de refrigeração do molde no processo de injeção**. 2020. 41 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Química - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2020.

Com o objetivo de avaliar a influência na qualidade da peça e no tempo de ciclo de diferentes canais de refrigeração do molde de injeção, utilizou-se o Moldflow®, um software de simulação, para avaliar o desempenho de seis configurações de canais de refrigeração distintas (em série, paralelo e ambos com lâminas e cascatas). Desenhou-se uma calota automotiva de polipropileno para a simulação. Avaliou-se os resultados de pressão do circuito de refrigeração, número de Reynolds, tempo até atingir a temperatura de ejeção e empenamento da peça. Concluiu-se por meio dos resultados obtidos com a simulação computacional que os canais com lâminas e cascatas não apresentaram vantagens e os canais em série e em paralelo demonstraram tempos semelhantes, porém para os canais em paralelo necessitou-se de uma pressão menor, portanto considerou-se este último a melhor opção.

Palavras-chave: Processo de injeção. Canais de refrigeração. Moldflow®.

ABSTRACT

DE SOUZA, Mariana Barbosa André. **Computer simulation of different mold cooling channel geometries in the injection process** 2020. 41 p. Work of Conclusion Course Graduation in Chemical Engineering - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2020.

With the objective of evaluate the influence on part quality and cycle time of different injection mold cooling channels, Moldflow®, a simulation software, was used to evaluate the performance of six different cooling channels configurations (in series, parallel and both with baffles and bubblers). A polypropylene automotive hub was designed for the simulation. The results of cooling channels circuit pressure, Reynolds number, time to eject temperature and part warpage were evaluated. It was concluded through the results obtained with the computer simulation that the channels with baffles and bubblers did not present advantages and the channels in parallel and series showed similar times, however for the channels in parallel it was necessary a lower pressure, so the latter was considered the best option.

Keywords: Injection process. Cooling channels. Moldflow®.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de uma injetora convencional.....	14
Figura 2 - Ciclo de injeção	14
Figura 3 - Canal de refrigeração em série	16
Figura 4 - Canal de refrigeração em paralelo	16
Figura 5 - Cascata	17
Figura 6 - Lâmina.....	17
Figura 7 - Espessura do molde.....	22
Figura 8 - Fronteiras do molde	23
Figura 9 - Mapeamento para locais de injeção	23
Figura 10 - Local de injeção	24
Figura 11 - Canais de refrigeração em série	24
Figura 12 - Canais de refrigeração em paralelo	24
Figura 13 - Canais de refrigeração em série com cascata	25
Figura 14 - Canais de refrigeração em paralelo com cascata	25
Figura 15 - Canais de refrigeração em série com lâmina	25
Figura 16 - Canais de refrigeração em paralelo com lâmina	25
Figura 17 - Pressão do circuito de refrigeração em série	26
Figura 18 - Pressão do circuito de refrigeração em paralelo	26
Figura 19 - Pressão do circuito de refrigeração em série com lâminas	27
Figura 20 - Pressão do circuito de refrigeração em série com cascata	27
Figura 21 - Pressão do circuito de refrigeração em paralelo com lâminas ...	28
Figura 22 - Pressão do circuito de refrigeração em paralelo com cascata ...	28
Figura 23 - Número de Reynolds canais de refrigeração em paralelo.....	29
Figura 24 - Número de Reynolds canal de refrigeração em série	30
Figura 25 - Número de Reynolds canal de refrigeração em série com cascata	30
Figura 26 - Número de Reynolds canais de refrigeração em paralelo com cascata	31

Figura 27 - Número de Reynolds canal de refrigeração em série com lâmina	31
Figura 28 - Número de Reynolds canais de refrigeração em paralelo com lâmina	32
Figura 29 - Tempo para atingir temperatura de ejeção canal de refrigeração em serie	32
Figura 30 - Tempo para atingir temperatura de ejeção canais de refrigeração em paralelo	33
Figura 31 - Tempo para atingir temperatura de ejeção canal de refrigeração em serie com cascata	33
Figura 32 - Tempo para atingir temperatura de ejeção canal de refrigeração em serie com lâmina	34
Figura 33 - Tempo para atingir temperatura de ejeção canais de refrigeração em paralelo com cascata	34
Figura 34 - Tempo para atingir temperatura de ejeção canais de refrigeração em paralelo com lâmina	35
Figura 35 – Contribuição do resfriamento no empenamento da peça com canal de refrigeração em série	35
Figura 36 - Contribuição do resfriamento no empenamento da peça com canais de refrigeração em paralelo	36
Figura 37 - Contribuição do resfriamento no empenamento da peça com canais de refrigeração em serie com lâmina	36
Figura 38 - Contribuição do resfriamento no empenamento da peça com canais de refrigeração em serie com cascata	37
Figura 39 - Contribuição do resfriamento no empenamento da peça com canais de refrigeração em paralelo com lâmina	37
Figura 40 - Contribuição do resfriamento no empenamento da peça com canais de refrigeração em paralelo com cascata	38
Quadro 1 - Métodos de processamento e produtos produzidos	13
Quadro 2 - Análise dos resultados	21

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipo de escoamento	18
-------------------------------------	----

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

LISTA DE ABREVIATURAS

kW	Kilo Watts
Kg	Kilo grama
J	Joules
Re	Número de Reynolds
m ³	Metro cúbico
m ²	Metro quadrado
N	Newton
s	Segundos
°C	Graus Celsius

LISTA DE SIGLAS

Abiplast	Associação Brasileira da Indústria do Plástico
PET	Polietileno tereftalato
PP	Polipropileno
PVC	Policloreto de vinila

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVOS	11
1.1.1	Objetivo geral	11
1.1.2	Objetivos específicos	11
2	REFERÊNCIAL TEÓRICO	12
2.1	POLÍMEROS	12
2.2	PROCESSAMENTO DE POLÍMEROS	12
2.3	PROCESSO DE INJEÇÃO	13
2.4	RESFRIAMENTO DO MOLDE	15
2.5	CANAIS DE REFRIGERAÇÃO	15
2.5.1	Lâminas e Cascatas	17
2.6	NÚMERO DE REYNOLDS	18
2.7	EMPENAMENTO	19
3	MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1	DESENHO DA PEÇA	20
3.2	MALHA	20
3.3	MOLDE E CANAL DE ALIMENTAÇÃO	20
3.4	CANAIS DE REFRIGERAÇÃO	20
3.5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	21
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
5	CONCLUSÃO	39
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

1 INTRODUÇÃO

A indústria de polímeros teve seu início com o domínio da técnica de vulcanização da borracha natural, em 1844. Diversos produtos começaram a ser fabricados a partir desse material, como pneus e câmaras de ar, porém ainda não havia um completo entendimento sobre as características moleculares dos polímeros. Isso começou a mudar em 1920, quando Hermann Staudinger decidiu dedicar-se aos estudos sobre o comportamento desses materiais. A partir de então, diversos polímeros foram sintetizados, como o nylon 6,6, polietileno tereftalato (PET), polipropileno, entre outros.

Os polímeros estão cada vez mais presentes no nosso dia a dia. Segundo o relatório de 2016 da Associação Brasileira da Indústria do Plástico (Abiplast), só no ano de 2015, a produção mundial foi de 269 milhões de toneladas. O setor automobilístico é o terceiro que mais consome materiais poliméricos, dos quais destaca-se o polipropileno (PP), utilizado para a fabricação de caixas de bateria, consoles, calotas e diversos outros componentes. O PP é o polímero mais utilizado na indústria automobilística, representando cerca de 32% dos polímeros presentes no automóvel, de acordo com Szeteiova (2010).

Segundo Cordebello (2003), para o processamento de polímeros termoplásticos, como o PP, o processo de injeção é um dos mais utilizados. Esse processo acontece em ciclo: fechamento do molde, injeção do polímero fundido, recalque, resfriamento e extração, sendo o resfriamento a etapa que consome mais tempo. O resfriamento é realizado através de canais presentes no molde, que são chamados de canais de refrigeração.

Para o setor automobilístico, assim como em qualquer setor da indústria, produzir mais em menos tempo é algo necessário. Na produção de peças injetadas, o gargalo é o processo de resfriamento do molde. Portanto, a diminuição do tempo de resfriamento possibilitaria o aumento da produção. Porém como otimizar o tempo de resfriamento sem que seja necessário desperdiçar matéria prima, especialmente em relação a polímeros muito utilizados como o polipropileno, e recursos com a produção de diversos moldes para testes com diferentes tipos de canais de refrigeração?

Atualmente pode-se contar com a simulação computacional em diversas áreas, inclusive na de processamento de polímeros. Esse método de análise está sendo cada dia mais utilizado, pois apresenta excelentes resultados e tem a vantagem de ser economicamente mais viável do que a produção de inúmeras peças para testes em cada parâmetro variado. A simulação de diferentes geometrias de canais de refrigeração pode indicar qual geometria é mais eficiente, possibilitando que o tempo de resfriamento seja menor e, conseqüentemente, o tempo de ciclo de injeção diminua.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Comparar diferentes geometrias de canais de refrigeração, utilizando o *software Moldflow Adviser® 2019*, em um molde de injeção e avaliar qual apresentou o melhor resultado em relação ao empenamento da peça e tempo de ciclo e pressão utilizada no circuito de refrigeração.

1.1.2 Objetivos específicos

- Fazer o desenho da peça de polipropileno;
- Dimensionar diferentes configurações de canais de refrigeração;
- Analisar os resultados da simulação e verificar qual canal de refrigeração apresentou o melhor resultado em relação ao empenamento da peça e tempo de ciclo e pressão utilizada no circuito de refrigeração.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 POLÍMEROS

Polímeros são moléculas que têm elevado peso molecular, macromoléculas, formadas por várias unidades de repetição chamadas de monômeros, ligados por ligação covalente. Essas unidades de repetição podem ser iguais, dando origem a homopolímeros, como o PP, ou diferentes, formando copolímeros, como a borracha sintética de estireno-butadieno (SBR) (CANEVAROLO JÚNIOR, 2002).

Segundo Mano (2004), os polímeros são classificados de acordo com sua fusibilidade e/ou solubilidade em termofixos e termoplásticos:

- Termofixos: materiais que podem ser moldados apenas uma vez, pois nesse processo sofrem uma reação conhecida como cura, formando ligações químicas altamente estáveis. Após a cura, esses materiais endurecem irreversivelmente, não podendo ser remoldados, pois não amolecem mais, e se forem expostos a um aumento da temperatura serão degradados (BLASS, 1988).
- Termoplásticos: são materiais que são aquecidos e, após resfriados, adquirem a forma que foram moldados, diferentemente dos termofixos, podem ser reaquecidos e moldados novamente. Isso se deve ao fato de os termoplásticos possuírem cadeias moleculares lineares ou com ramificações que apresentam interação secundária com as outras moléculas. Esse tipo de cadeia molecular possui ligações intermoleculares fracas e com o aquecimento tornam-se mais fracas ainda, e isso acarreta no amolecimento do material sem que haja degradação. A degradação só ocorrerá caso o termoplástico seja exposto a uma temperatura igual ou superior a de degradação, que varia para cada polímero (BLASS, 1988).

2.2 PROCESSAMENTO DE POLÍMEROS

Existem diversos processos nos quais os polímeros podem ser submetidos para que sejam moldados na forma desejada. Para escolha de qual tipo de processamento é necessário levar em consideração as características finais

desejadas do produto e se trata de um material termofixo ou termoplástico (MANO, 2004). Alguns dos principais métodos e sua utilização encontram-se listados no quadro 1.

Quadro 1 - Métodos de processamento e produtos produzidos

Processo	Produtos
Compressão	Solados de borracha, peças de resina melamínica que imitam louça
Injeção	Calotas, para-choques, utensílios domésticos
Calandragem	Cortinas de Policloreto de vinila (PVC) para banheiros
Extrusão	Tubos e conexões de PVC
Sopro	Peças ocas (garrafas, frascos)
Termoformação	Produtos descartáveis (pratos e copos)

Fonte: Mano (2004)

Os processos de compressão e extrusão são indicados para termofixos, já a injeção, calandragem, sopro e termoformação, para termoplásticos. No entanto, apesar de haver inúmeros tipos de processamento de termoplástico, a injeção é o mais utilizado (MANO, 2004).

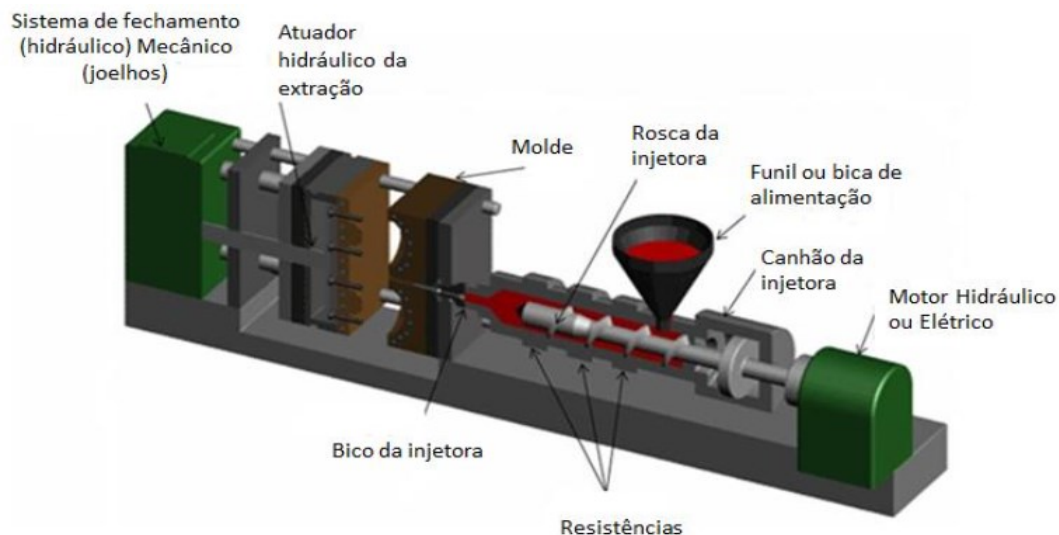
2.3 PROCESSO DE INJEÇÃO

O processo de injeção acontece em várias etapas em uma máquina denominada injetora. A injetora é composta por:

Um sistema capaz de homogeneizar e injetar o polímero fundido: rosca recíproca acionada por sistemas mecânicos, elétricos, pneumáticos e/ou hidráulicos; canhão, que contém em seu interior a rosca recíproca; mantas elétricas capazes de aquecer o canhão e por conseguinte, transmitir calor ao polímero; Molde: capaz de dar a forma à massa polimérica, sendo essa injetada no interior do molde sob alta pressão e com velocidade controlada; o mesmo molde é capaz de gerar o resfriamento do produto de forma adequada através de fluidos que circulam no seu interior e, finalmente, este possui um mecanismo capaz de executar a ejeção da peça acabada ao se abrir. (MANRICH, 2005, p. 277)

Uma representação esquemática de uma máquina injetora pode ser observada na Figura 1.

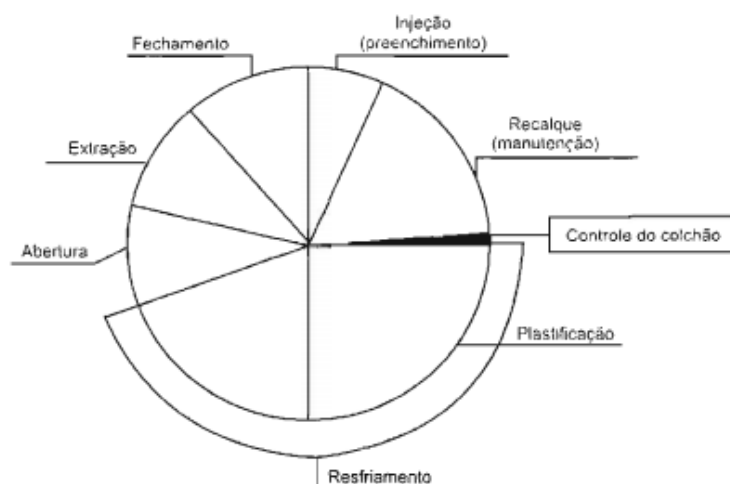
Figura 1 - Esquema de uma injetora convencional



Fonte: Lopes (2016)

O tempo, a partir do fechamento do molde até o momento em que ele se fecha outra vez, no início de outro ciclo, é chamado de ciclo de injeção e pode ser observado na Figura 2. O ciclo de injeção é subdividido em ciclo da máquina e no tempo que se leva para retirar o a peça do molde. O ciclo da máquina considera o tempo de abertura do molde, tempo para injeção e resfriamento da peça, e o tempo de fechamento do molde. Como pode ser visto na Figura 2, a etapa que leva mais tempo é a de resfriamento do molde (HARADA, 2004).

Figura 2 - Ciclo de injeção



Fonte: Harada (2004)

2.4 RESFRIAMENTO DO MOLDE

O material é injetado a temperaturas superiores a que se encontra o molde, por consequência a peça injetada troca calor com o molde, iniciando sua solidificação. No entanto, é necessário retirar calor do molde para que esse continue realizando a troca térmica com a peça até que ela atinja a temperatura necessária para sua ejeção (HARADA, 2004).

O resfriamento do molde ocorre por meio de canais presentes em seu interior onde circula, normalmente, água que troca calor com as paredes do molde, fazendo, assim, o resfriamento do mesmo e conseqüentemente da peça. Segundo Blass (1988), a quantidade de calor que deve ser retirada do molde depende do material que foi injetado e pode ser descrita pela equação 1:

$$Q = 3,6 Gh[c_p (T_i - T_m) + L] \quad (1)$$

Onde,

Q: quantidade de calor extraída (kW);

G_h: quantidade de material injetada por hora (Kg/h);

C_p: calor específico do material (J/kg.°C);

T_i: temperatura de injeção (°C);

T_m: temperatura do molde (°C);

L: calor latente do material.

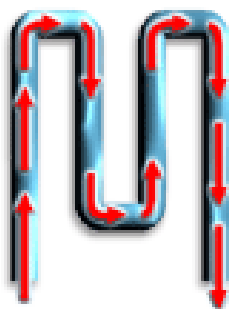
2.5 CANAIS DE REFRIGERAÇÃO

Segundo Harada (2004), os canais de refrigeração podem ser feitos com tubos de cobre inseridos no molde ou serem furados diretamente no molde, sendo esse último o meio mais utilizado por ser mais econômico e conveniente. Em relação a distância mínima à peça, recomenda-se 25 mm, pois muito próximo ao canal de refrigeração há uma queda de temperatura mais acentuada, que pode causar defeitos na peça.

Os canais podem ser classificados como em série e em paralelo. Os em série possuem um design mais simples, são ligados em um único ciclo, como na Figura 3, e por isso são os mais comuns. A extensão de um canal de refrigeração em série não

pode ser muito longa, pois isso acarreta em um aumento na queda de pressão, o que não é desejável, devido a necessidade de bombas mais potentes (MOLDFLOW, 2018).

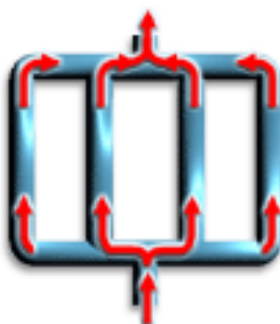
Figura 3 - Canal de refrigeração em série



Fonte: Moldflow® (2018)

Os canais paralelos são usados quando os em série não são eficientes ou possuem uma queda de pressão muito grande. Nesse tipo de canal a taxa de fluxo do fluido refrigerante pode variar ao longo do circuito, o que pode gerar um resfriamento não uniforme (PARK, DANG, 2012). Um exemplo de canal de refrigeração em paralelo pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 - Canal de refrigeração em paralelo

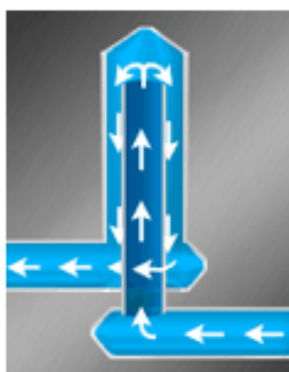


Fonte: Moldflow® (2018)

2.5.1 Lâminas e Cascatas

Lâminas e cascatas podem ser adicionadas aos canais de refrigeração para proporcionar uma melhor troca térmica, pois desviam o fluxo para áreas onde os canais normais não conseguem atingir. As cascatas são formadas por um tubo de diâmetro menor no interior de um com diâmetro maior. O fluido entra pelo fundo do tubo de menor diâmetro e borbulha até o topo e sai pelo tubo de maior diâmetro, como indicado na Figura 5 (MOLDFLOW, 2018).

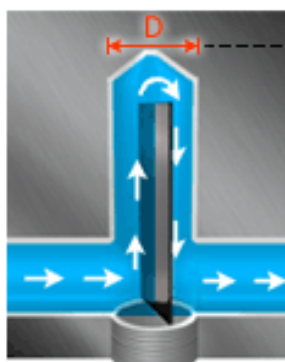
Figura 5 - Cascata



Fonte: Moldflow® (2018)

As lâminas são semelhantes às cascatas, porém no interior do tubo encontra-se uma placa, como na Figura 6.

Figura 6 - Lâmina



Fonte: Moldflow® (2018)

2.6 NÚMERO DE REYNOLDS

O número de Reynolds (Re) é um parâmetro adimensional descrito pela equação 2:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2)$$

Onde,

μ : Viscosidade dinâmica do fluido (N.s/m²);

ρ : Massa específica do fluido (kg/m³);

v : Velocidade do fluido (m/s);

D : Diâmetro do tubo (m);

O número de Reynolds classifica um escoamento interno em tubos em laminar e turbulento (ÇENGEL, CIMBALA, 2007). A tabela com os valores de Reynolds pode ser vista abaixo:

Tabela 1 - Tipo de escoamento

Reynolds	Escoamento
≤ 2300	Laminar
$2300 < RE \leq 4000$	Transição
< 4000	Turbulento

Fonte: Çengel, Cimbala (2007)

Segundo Incropera (2008), o tipo de escoamento tem grande influência nas taxas de transferência de calor. Para trocas térmicas melhores deve-se trabalhar com o escoamento turbulento.

2.7 EMPENAMENTO

Peças plásticas injetadas durante o resfriamento e após sofrem um processo chamado de contração, que pode ser uniforme ou não uniforme. A contração não uniforme pode acarretar em diversos problemas como: não atingir as dimensões mínimas necessárias, aumento do stress interno e até mesmo o empenamento da peça (MALLOY, 2010).

Vários fatores podem levar ao empenamento da peça, segundo Malloy (2010):

- Contração térmica não simétrica devido ao resfriamento desigual da peça.
- Contração volumétrica não uniforme.
- Comportamento anisotrópico do material devido à orientação induzida pelo fluxo.
- Deformação térmica diferencial devido aos efeitos da geometria.

O empenamento é uma condição indesejada na peça injetada, por isso deve-se ao máximo evitá-lo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 DESENHO DA PEÇA

A peça utilizada foi uma calota automobilística, pois apresenta uma geometria não muito complexa e possibilita uma boa avaliação do empenamento, desenhada no *software* Salomé versão 8.3.0.

3.2 MALHA

O desenho foi importado no programa *Moldflow Adviser*® 2019, em seguida foi selecionado o tipo de análise, dentre duas opções: *Dual Domain* ou *True 3D*.

3.3 MOLDE E CANAL DE ALIMENTAÇÃO

Após feitas as configurações preliminares, o próximo passo foi a definição das fronteiras do molde e as configurações da alimentação. O canal de alimentação foi inserido por meio da função assistente do sistema de alimentação que indica qual a melhor posição.

3.4 CANAIS DE REFRIGERAÇÃO

Foram desenhadas seis geometrias diferentes de canais de refrigeração:

- Canais em série;
- Canais em paralelo;
- Canais em série com cascata;
- Canais em série com lâmina;
- Canais em paralelo com cascata;
- Canais em paralelo com lâmina;

3.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para avaliação dos resultados da simulação foram gerados gráficos indicados e avaliados os pontos descritos no quadro 2.

Quadro 2 - Análise dos resultados

Gráfico	Análise
Pressão do circuito de refrigeração	Pressão necessária para o circuito de resfriamento, tendo em vista que quanto maior a pressão maior a potência da bomba necessária
Número de Reynolds	Turbulência do escoamento, pois visto no item 3.6 o tipo de escoamento tem influência da taxa de transferência de calor
Tempo até atingir a temperatura de ejeção	Diminuição do tempo de refrigeração, que uma etapa crítica no ciclo de injeção
Indicador de empenamento	Avaliação da contribuição do circuito de refrigeração no empenamento da peça.

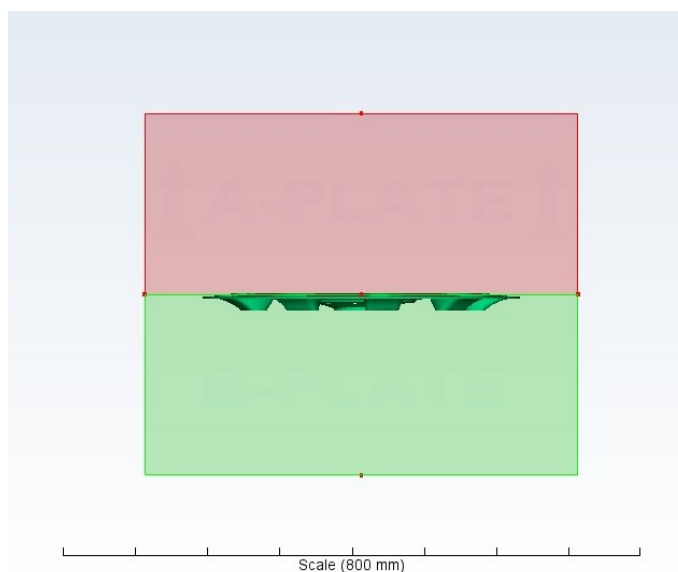
Fonte: Autoria própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o desenho da peça no Salomé foi usada como referência uma calota genérica com 440mm de diâmetro. Após finalizado o desenho, a peça foi importada para o *Moldflow Adviser*®. Com a ajuda do *Import Wizard* foi escolhida para a construção da malha a opção *Dual Domain*, que é recomendado para peças de pouca espessura. Ao selecionar essa opção, o programa, que utiliza o método dos elementos finitos, irá construir uma malha triangular. Já para o material da peça foi definido um PP genérico.

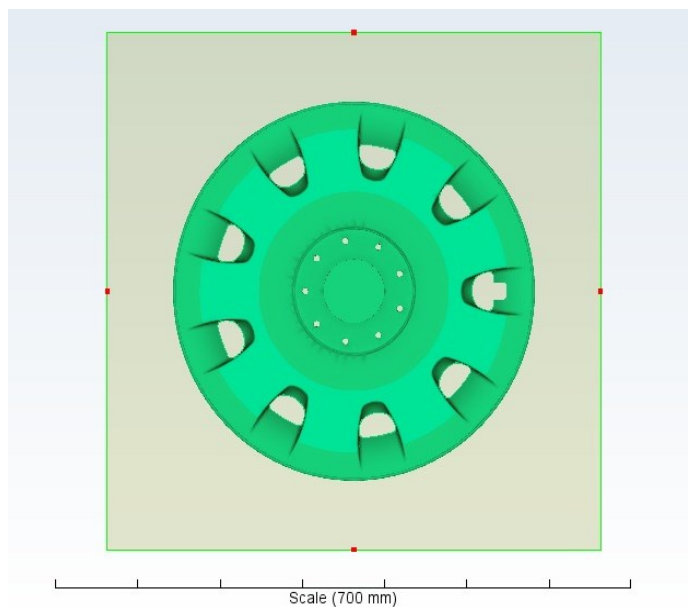
Em seguida, foi definido o tamanho do molde, com 600mmx600mm e 250mm de espessura, como pode ser visto na figura 7, e o material, *Tool Steel P-20*. É possível visualizar as fronteiras do molde na figura 8.

Figura 7 - Espessura do molde



Fonte: Autoria própria

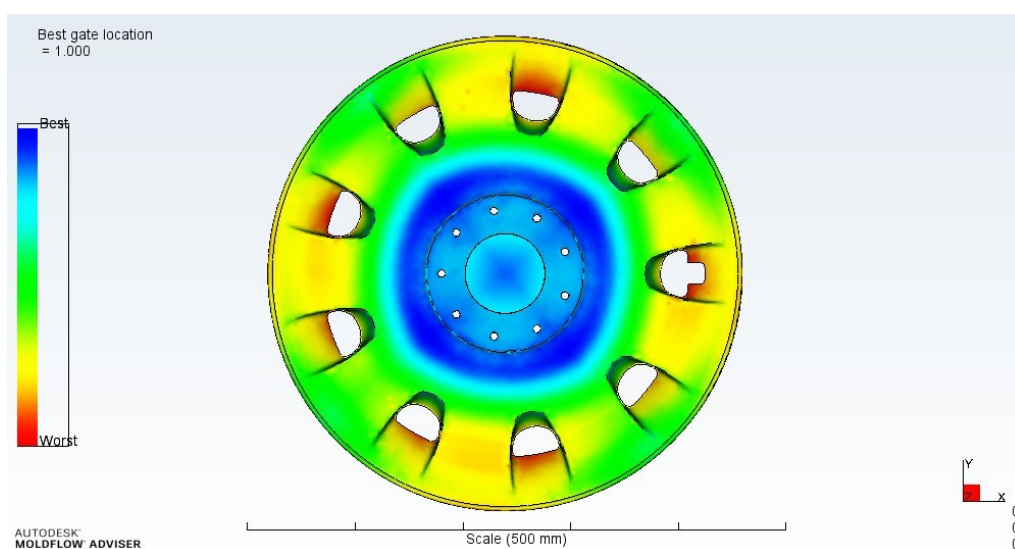
Figura 8 - Fronteiras do molde



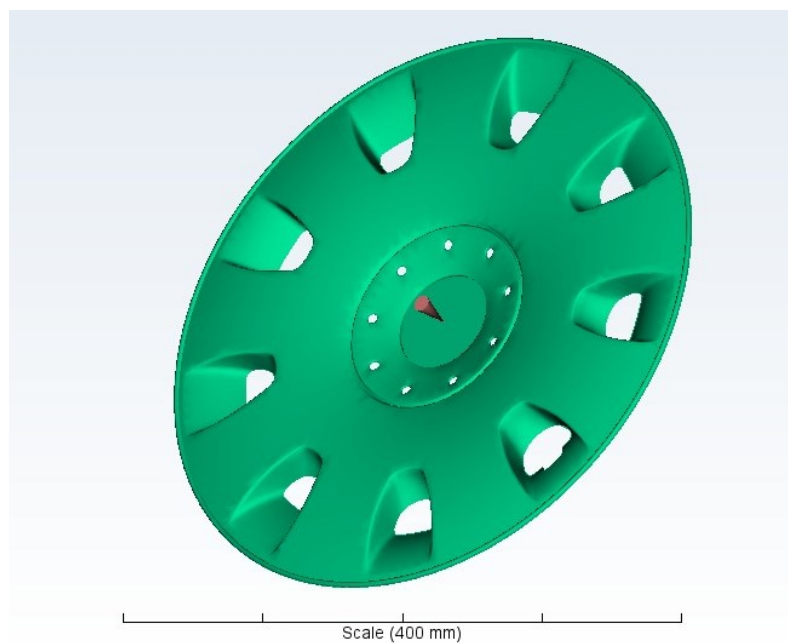
Fonte: Autoria própria

Com o auxílio do *Runner Wizard* foi feita uma análise para determinar as melhores regiões para injeção e, como pode ser visto na figura 9, a parte central é o local mais adequado. O ponto escolhido foi o centro da peça, como indica a figura 10.

Figura 9 - Mapeamento para locais de injeção



Fonte: Autoria própria

Figura 10 - Local de injeção**Fonte: Autoria própria**

Após feitas os passos descritos acima, iniciou-se a construção dos canais de refrigeração nas seguintes configurações: em série, paralelo, em série com lâmina, em série com cascata, paralelo com lâmina e paralelo com cascata, como pode ser visto nas figuras 11, 12, 13, 14, 15 e 16:

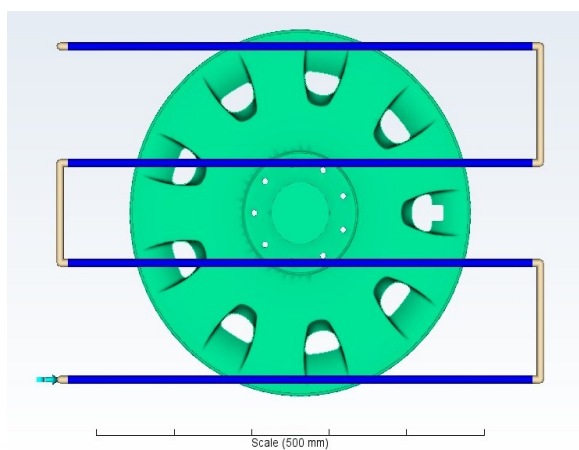
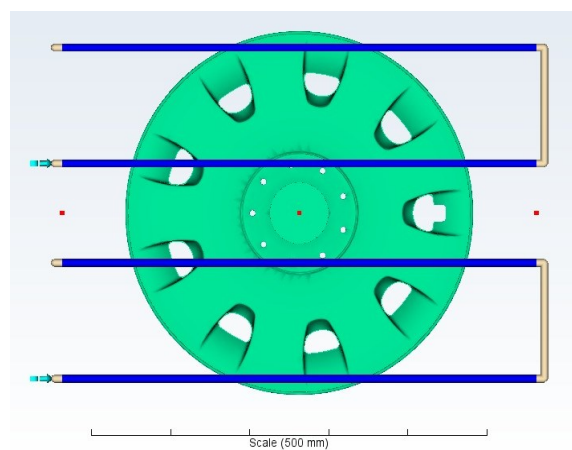
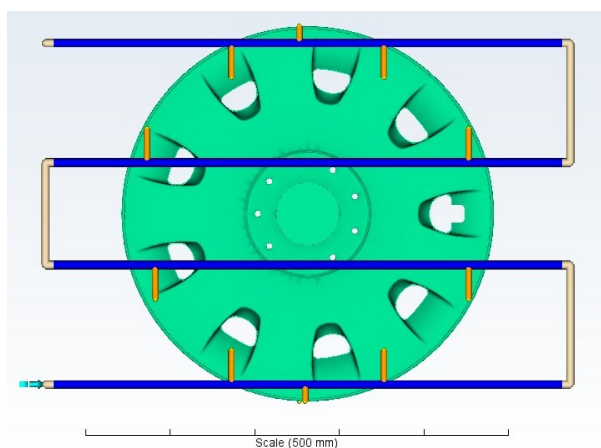
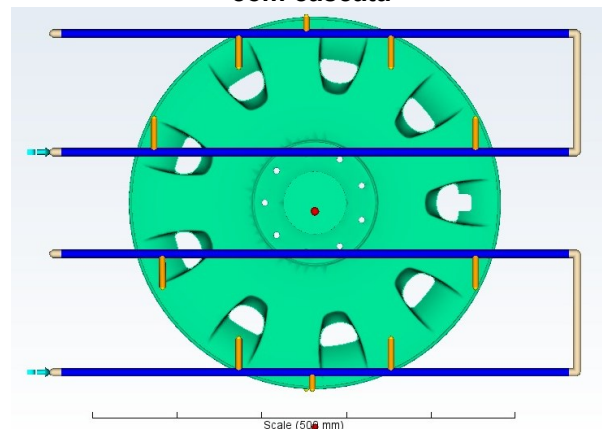
Figura 11 - Canais de refrigeração em série**Fonte: Autoria própria****Figura 12 - Canais de refrigeração em paralelo****Fonte: Autoria própria**

Figura 13 - Canais de refrigeração em série com cascata



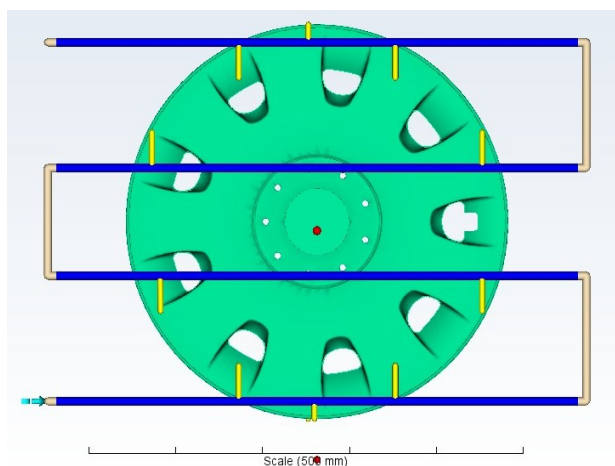
Fonte: Autoria própria

Figura 14 - Canais de refrigeração em paralelo com cascata



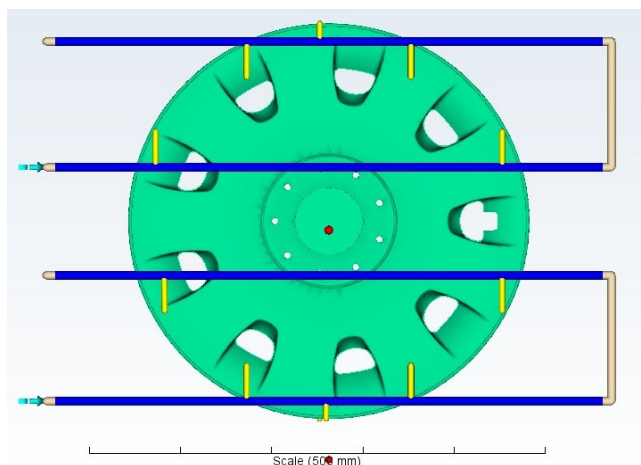
Fonte: Autoria própria

Figura 15 - Canais de refrigeração em série com lâmina



Fonte: Autoria própria

Figura 16 - Canais de refrigeração em paralelo com lâmina

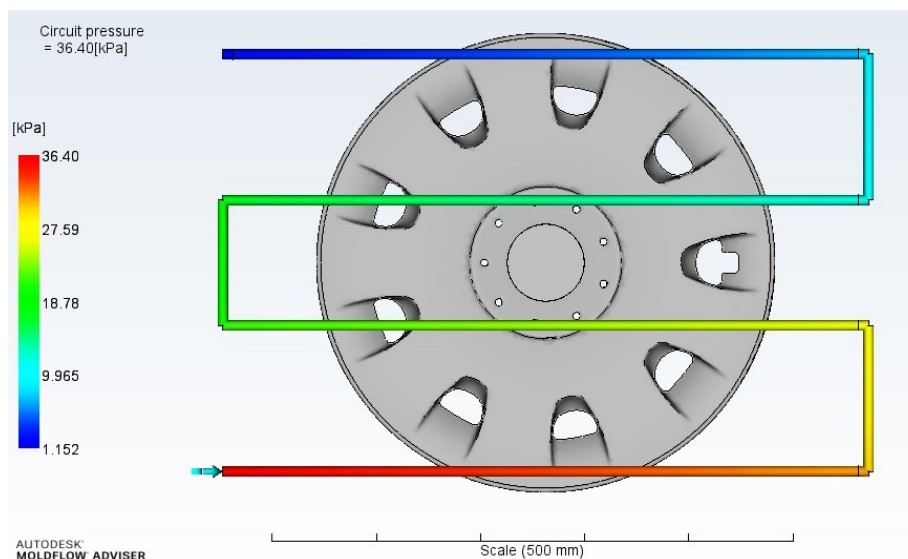


Fonte: Autoria própria

Os canais de refrigeração possuem 10mm de diâmetro com uma vazão de 10 L/min, sendo o fluido refrigerante água com temperatura inicial de 25 °C. Após as configurações descritas iniciou-se a simulação e com os resultados foram obtidos os gráficos mencionados no quadro 2 do item 4.5.

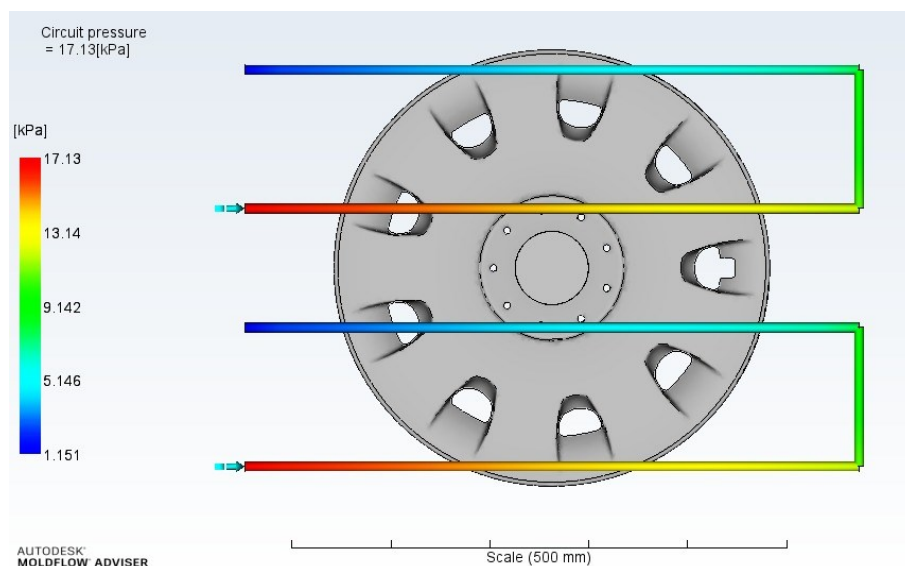
Nas figuras 17 e 18 é possível observar a pressão dos circuitos de refrigeração em série e em paralelo.

Figura 17 - Pressão do circuito de refrigeração em série



Fonte: Autoria própria

Figura 18 - Pressão do circuito de refrigeração em paralelo

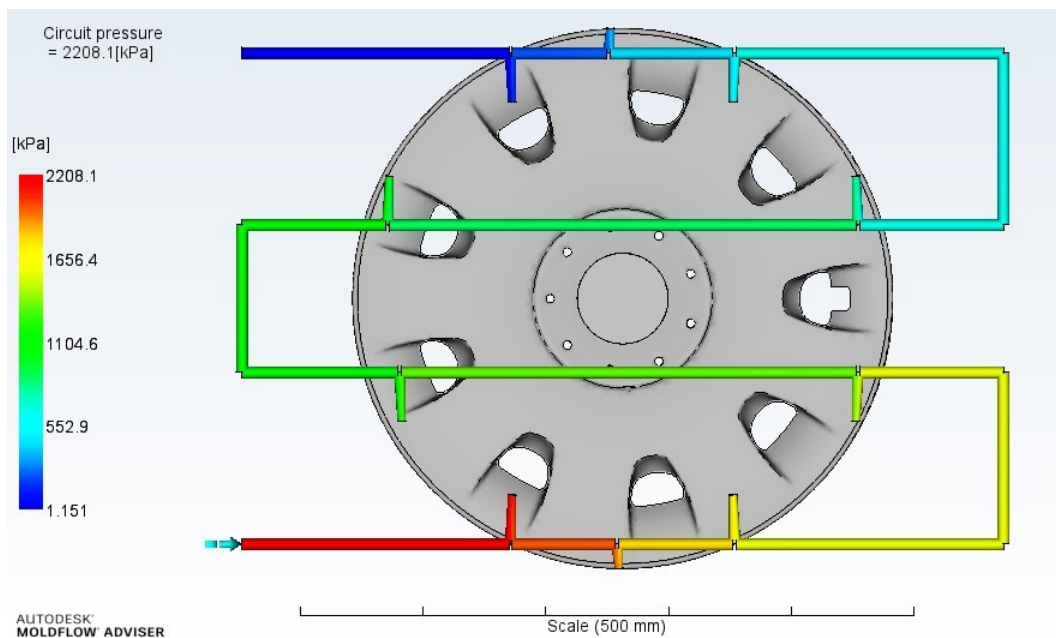


Fonte: Autoria própria

Pode-se observar que a pressão inicial requerida do circuito de refrigeração em série (36,40 kPa) é praticamente o dobro da em paralelo (17,13 kPa), pois possui uma maior extensão. Isso implica em uma bomba de maior potência se comparado

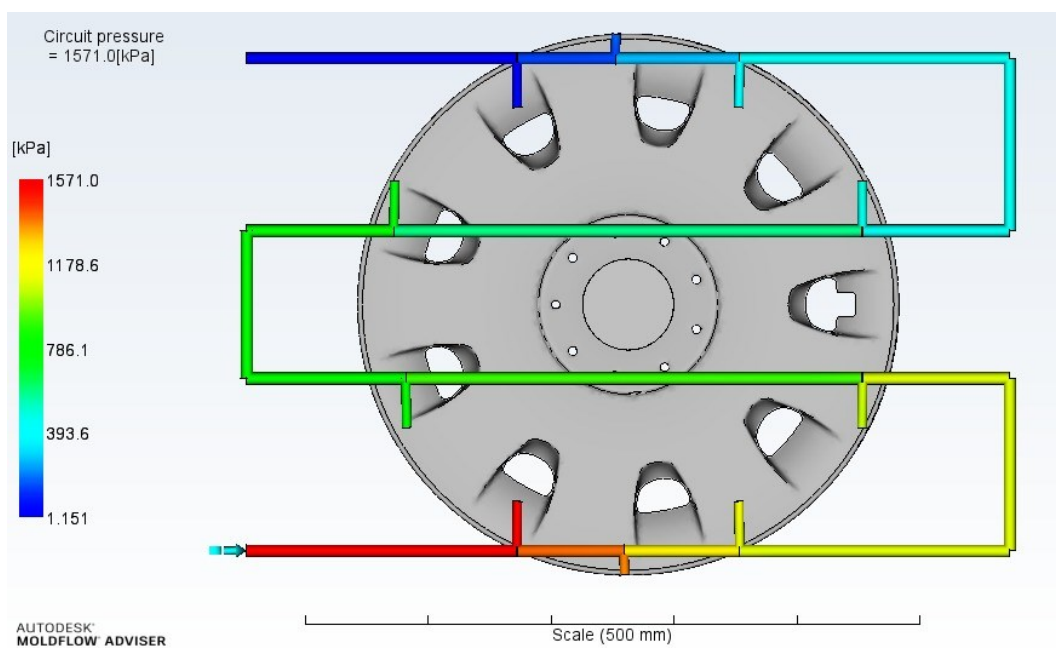
ao em paralelo. Agora, nas figuras 19, 20, 21 e 22 estão os resultados dos canais de refrigeração com lâminas e cascatas.

Figura 19 - Pressão do circuito de refrigeração em série com lâminas

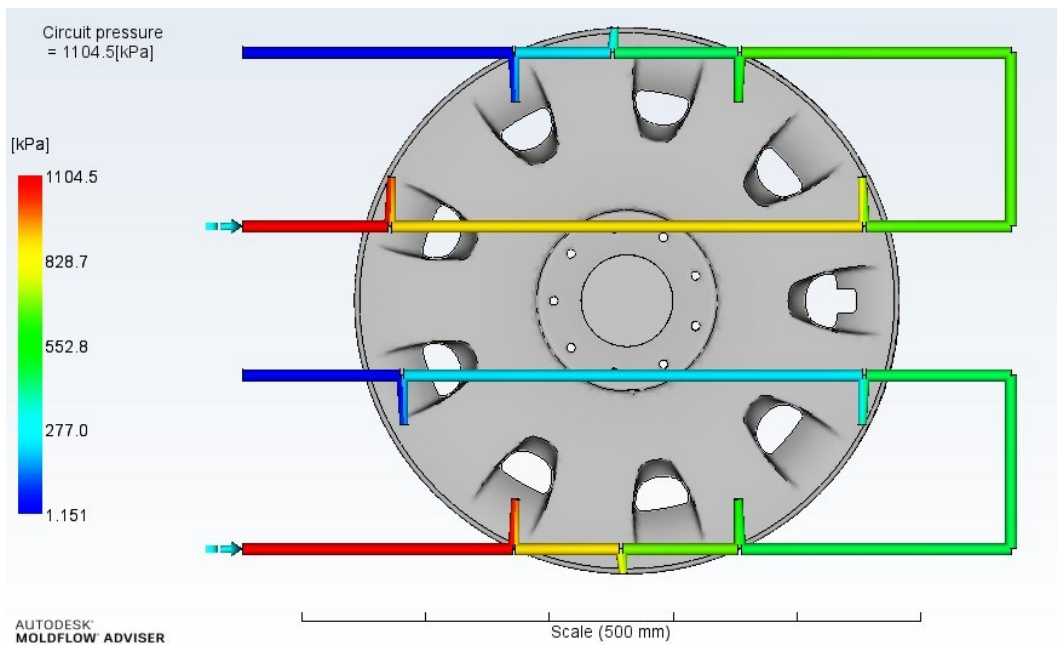


Fonte: Autoria própria

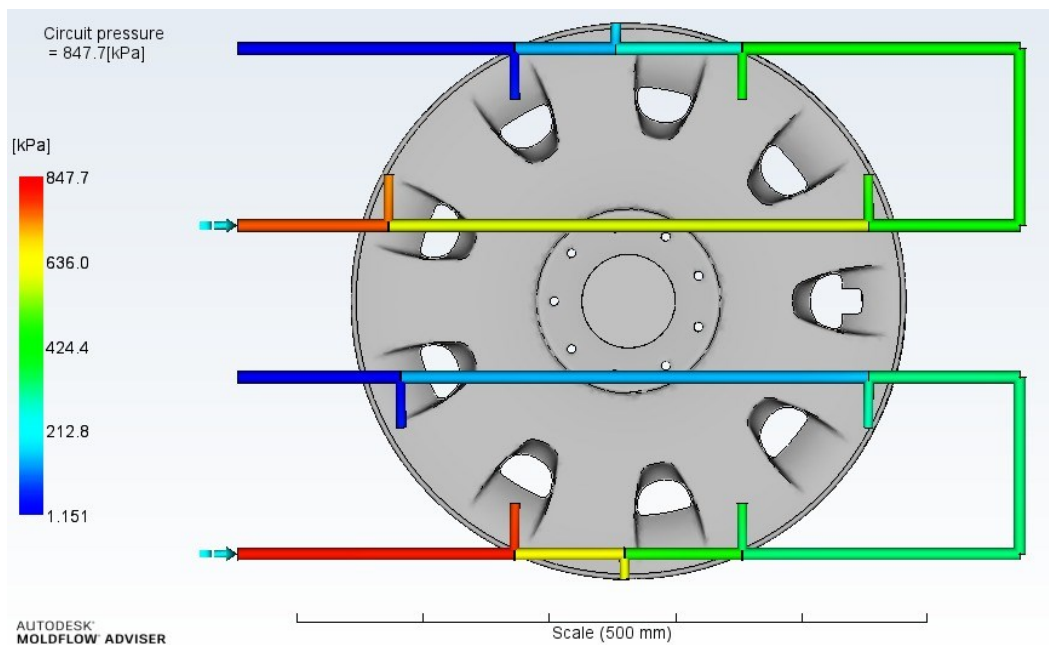
Figura 20 - Pressão do circuito de refrigeração em série com cascata



Fonte: Autoria própria

Figura 21 - Pressão do circuito de refrigeração em paralelo com lâminas

Fonte: Autoria própria

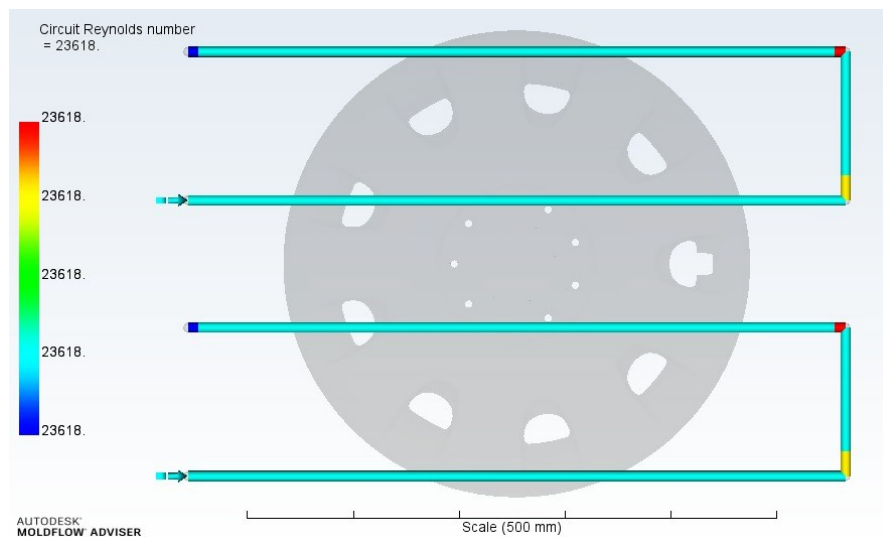
Figura 22 - Pressão do circuito de refrigeração em paralelo com cascata

Fonte: Autoria própria

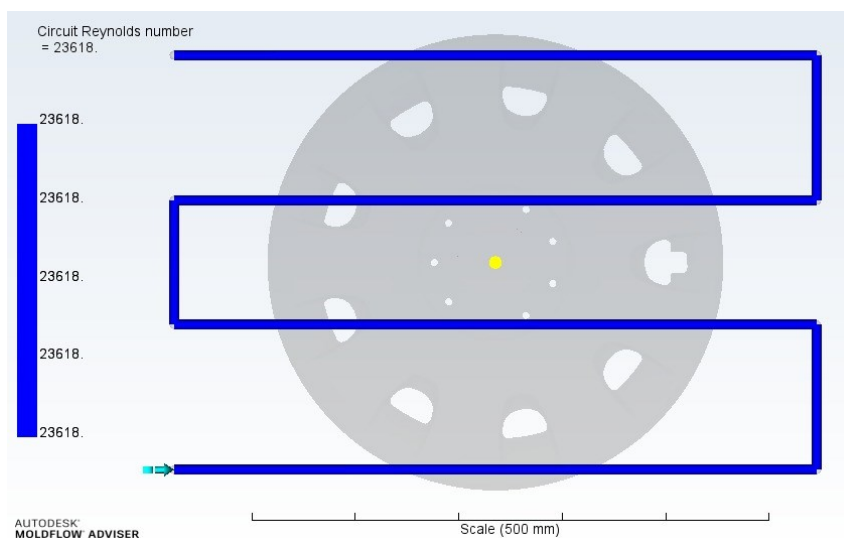
Analisando os resultados mostrados vemos que os circuitos de refrigeração em série com lâminas e cascatas têm, respectivamente, pressão de 2208,1 kPa e 1571,0 kPa. Já os em paralelo com lâminas, 1104,5 kPa, e com cascata, 847,7 kPa. É possível perceber que os canais de refrigeração com os acidentes demandam uma pressão muito superior se comparados aos canais com as configurações mais simples, das figuras 17 e 18.

Outro fator a ser observado é o número de Reynolds do escoamento, pois escoamentos turbulentos apresentam uma melhor troca térmica. Os canais em série e em paralelo apresentaram um Número de Reynolds de 23618, como pode ser visto nas figuras 23 e 24, o que caracteriza um escoamento de turbulento.

Figura 23 - Número de Reynolds canais de refrigeração em paralelo

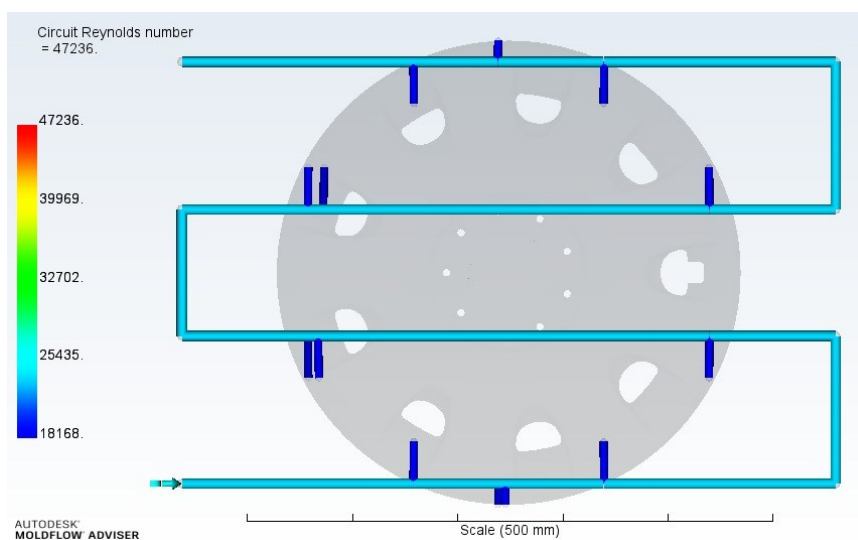


Fonte: Autoria própria

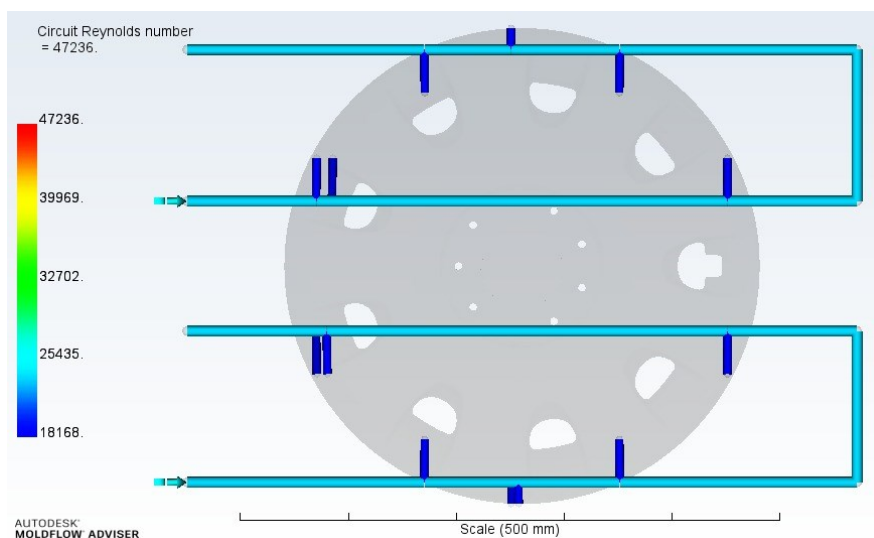
Figura 24 - Número de Reynolds canal de refrigeração em série

Fonte: Autoria própria

Já as configurações com cascatas, mostrados nas figuras 25 e 26, possuem um Re de 25435 na extensão do canal de refrigeração e de 18168 nas cascatas, tendo um escoamento turbulento em ambos, respectivamente.

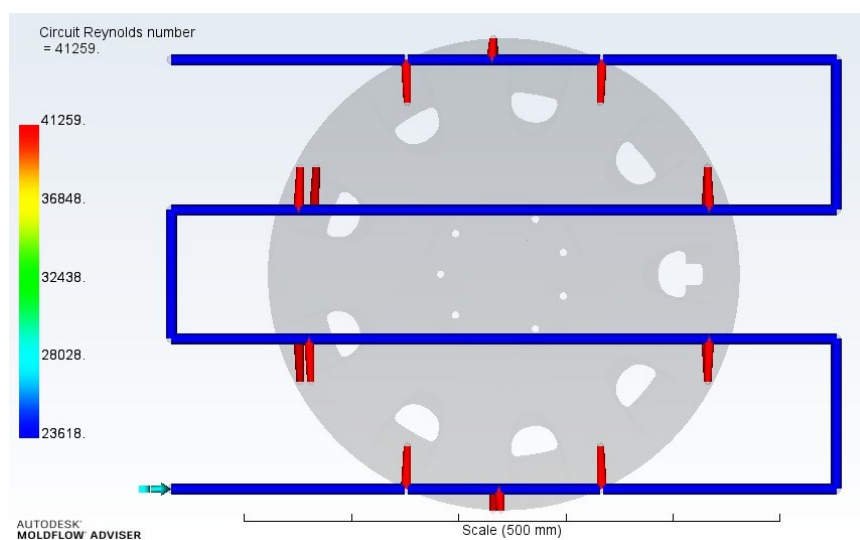
Figura 25 - Número de Reynolds canal de refrigeração em série com cascata

Fonte: Autoria própria

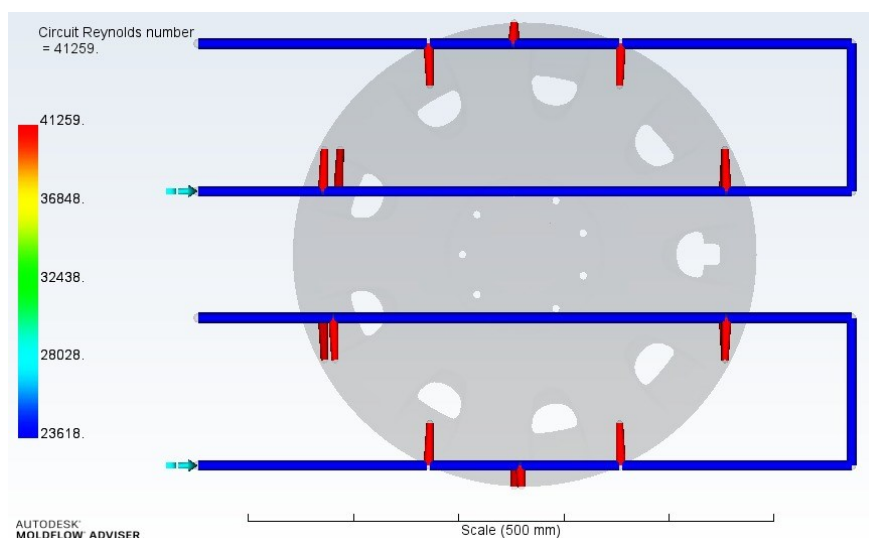
Figura 26 - Número de Reynolds canais de refrigeração em paralelo com cascata

Fonte: Autoria própria

Nas versões, tanto em série quanto em paralelo, com lâminas tem-se um escoamento de turbulento na extensão do canal de refrigeração ($Re = 23618$) e turbulento também nas lâminas ($Re = 41259$), como mostrado nas figuras 27 e 28.

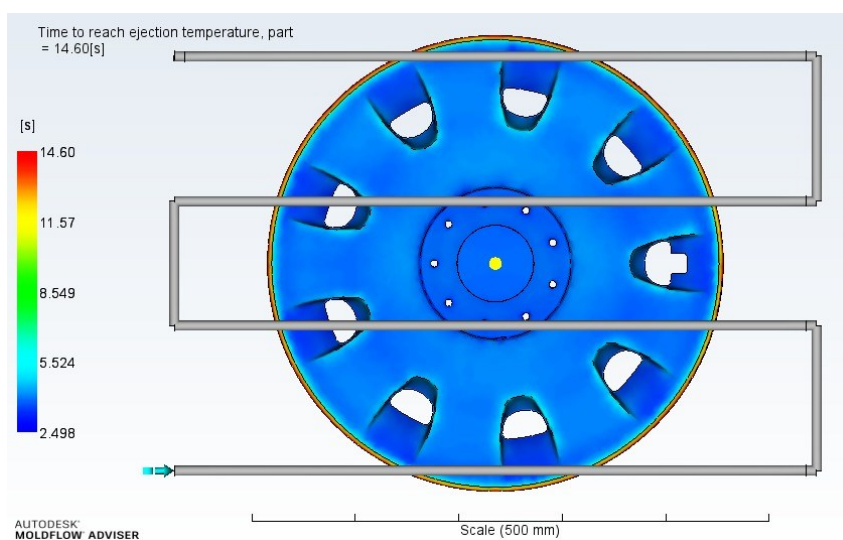
Figura 27 - Número de Reynolds canal de refrigeração em série com lâmina

Fonte: Autoria própria

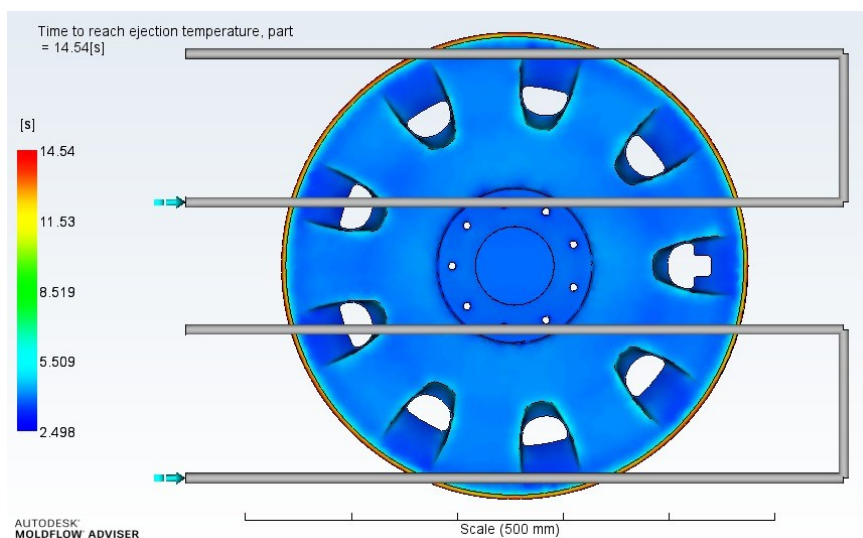
Figura 28 - Número de Reynolds canais de refrigeração em paralelo com lâmina

Fonte: Autoria própria

A seguir, nas figuras 29 e 30, podemos ver o tempo até atingir a temperatura de ejeção dos canais de refrigeração em paralelo e em série. Ambas levam um tempo maior para atingir a temperatura nas extremidades da peça, sendo o resfriamento por canais em paralelo ligeiramente mais rápido, 14,54s se comparado com o canal em série 14,6s.

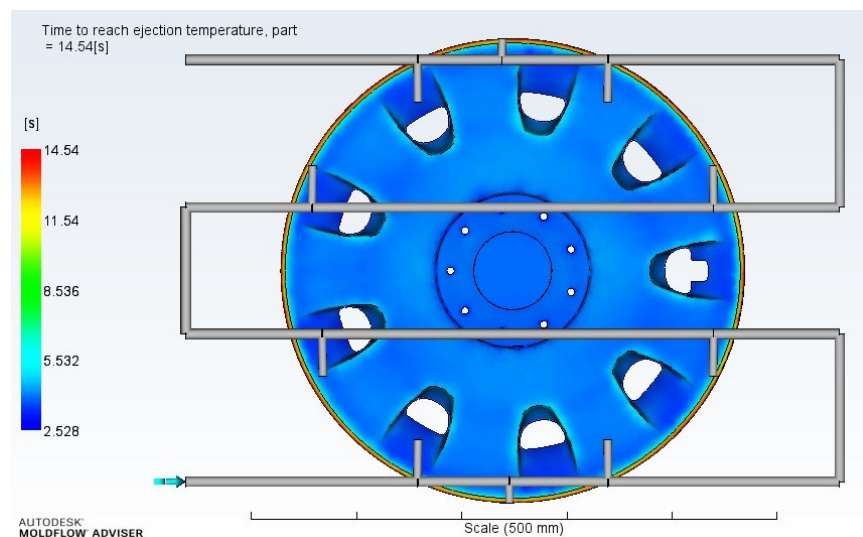
Figura 29 - Tempo para atingir temperatura de ejeção canal de refrigeração em serie

Fonte: Autoria própria

Figura 30 - Tempo para atingir temperatura de ejeção canais de refrigeração em paralelo

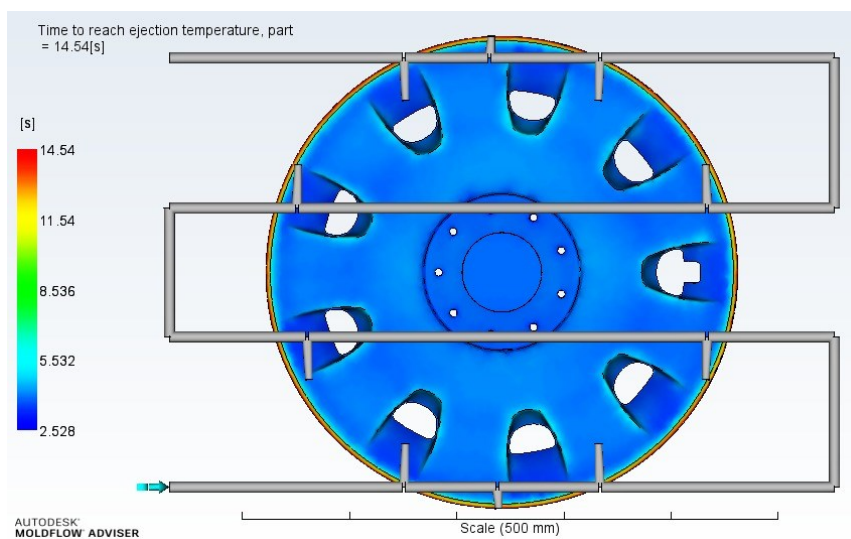
Fonte: Autoria própria

Para as configurações com lâminas e cascatas em série, apresentadas nas figuras 31 e 32, houve uma redução de 0,06s no tempo, se comparadas com os canais em serie sem acessórios, porém não apresentaram diferença nos tempos entre si.

Figura 31 - Tempo para atingir temperatura de ejeção canal de refrigeração em serie com cascata

Fonte: Autoria própria

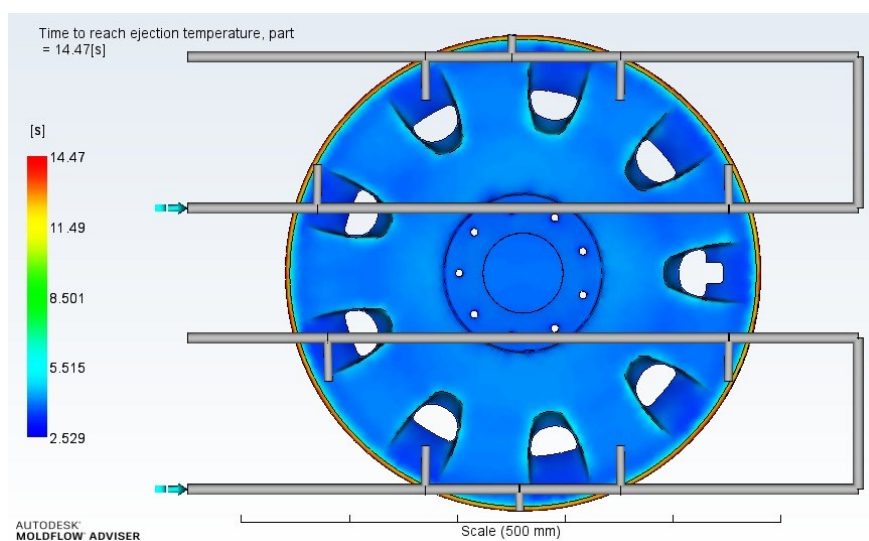
Figura 32 - Tempo para atingir temperatura de ejeção canal de refrigeração em serie com lâmina



Fonte: Autoria própria

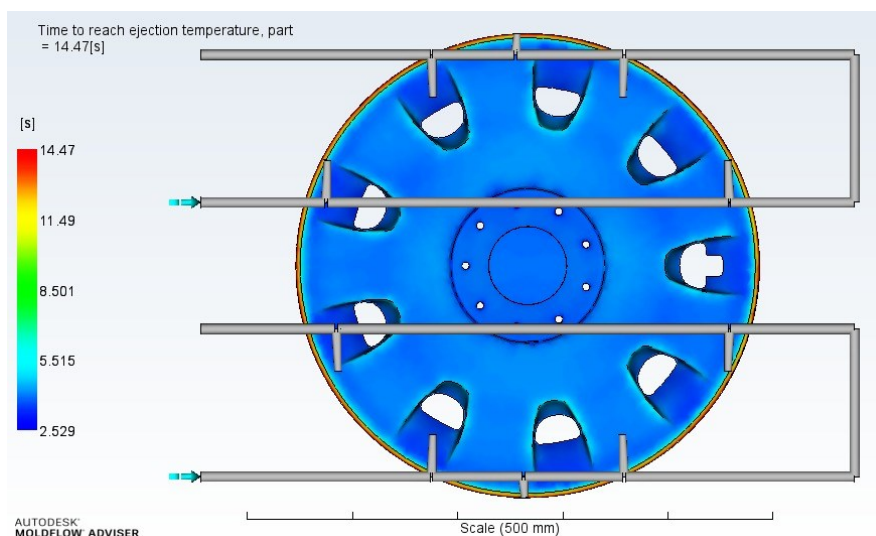
Em paralelo com lâminas e cascatas também houve diminuição do tempo de 0,07s, se comparado com a configuração em paralelo mais simples. Porém também não apresentaram diferença entre si, como pode ser visto nas figuras 33 e 34.

Figura 33 - Tempo para atingir temperatura de ejeção canais de refrigeração em paralelo com cascata



Fonte: Autoria própria

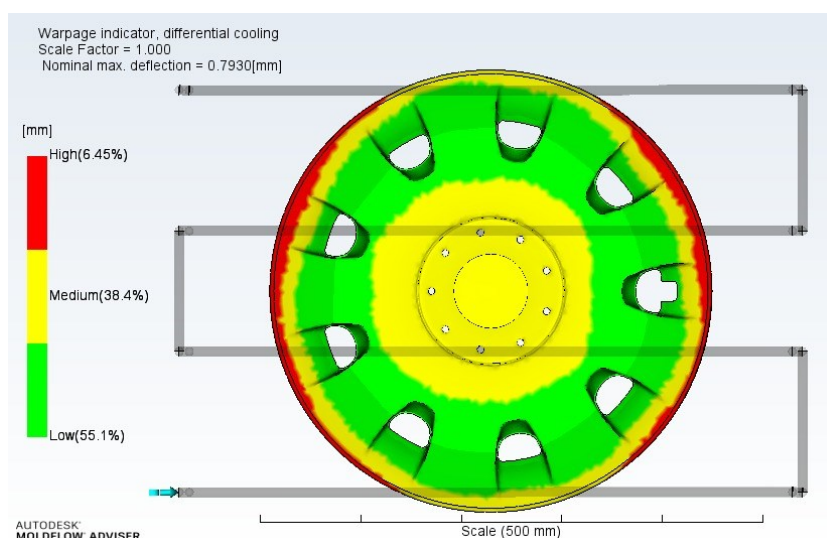
Figura 34 - Tempo para atingir temperatura de ejeção canais de refrigeração em paralelo com lâmina



Fonte: Autoria própria

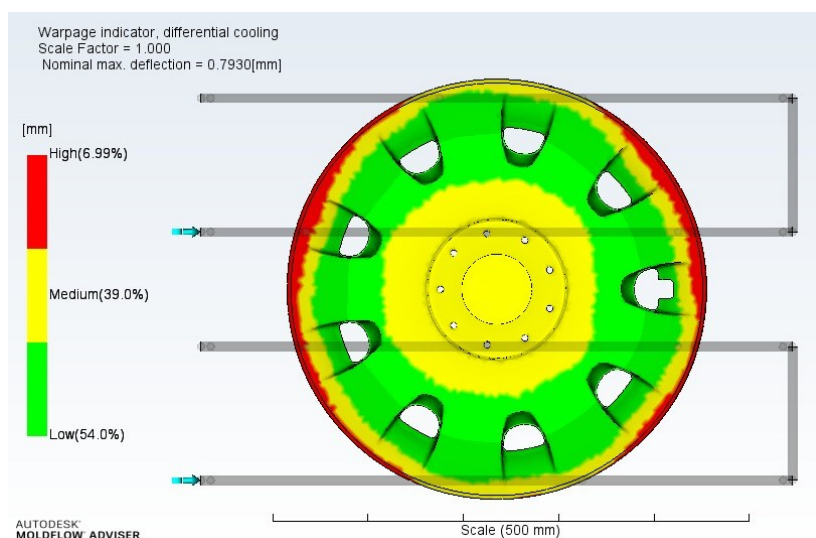
Por fim, nas figuras 35 e 36, temos um indicativo da influência do resfriamento no empenamento da peça com canais de refrigeração em série e em paralelo. Podemos notar que a maior contribuição está na extremidade da peça e com a configuração em paralelo o resfriamento influencia fortemente em 6,99% da superfície da peça, enquanto em série apenas em 6,45%. Também há uma diferença de 1% em relação a baixa influência do resfriamento sobre o empenamento, tendo em série a maior área com baixa contribuição.

Figura 35 – Contribuição do resfriamento no empenamento da peça com canal de refrigeração em série



Fonte: Autoria própria

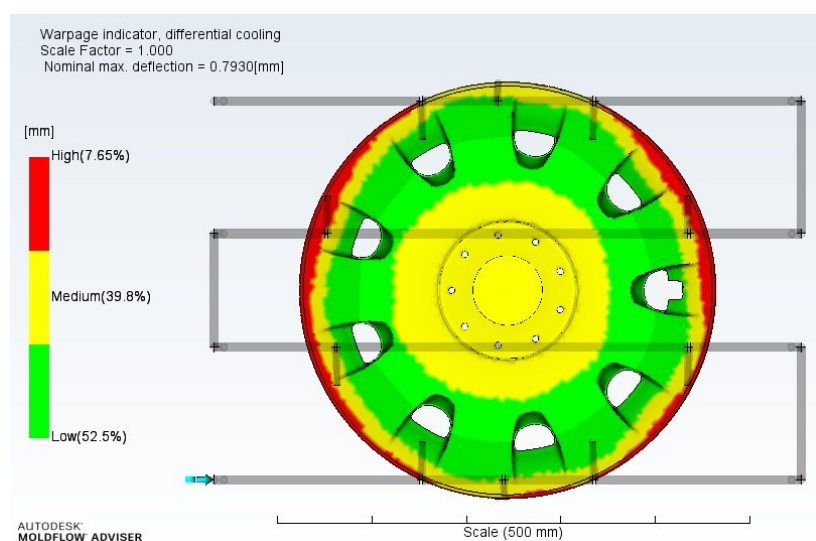
Figura 36 - Contribuição do resfriamento no empenamento da peça com canais de refrigeração em paralelo



Fonte: Autoria própria

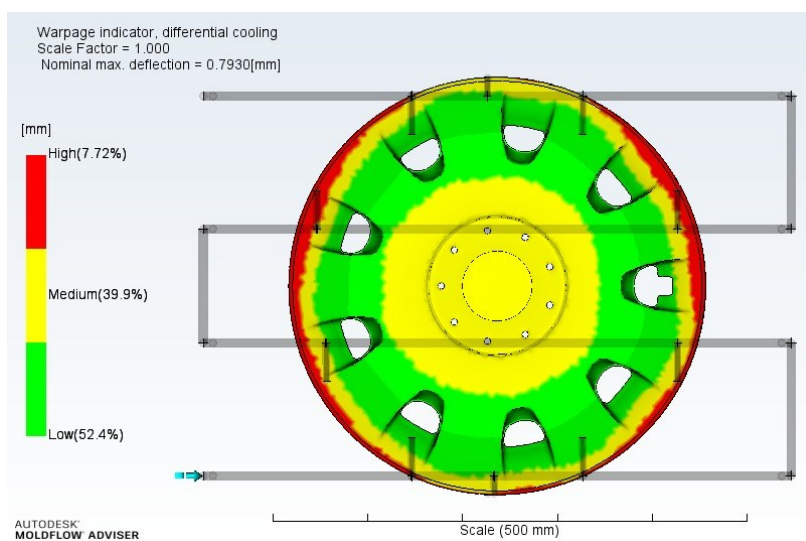
As figuras seguintes, 37, 38, 39 e 40, exibem o resultado da influência do resfriamento no empenamento da peça para os canais com lâminas e cascatas. Novamente, os canais de refrigeração em série apresentaram uma contribuição menor, quase 1 %, se comparados com os em paralelo.

Figura 37 - Contribuição do resfriamento no empenamento da peça com canais de refrigeração em serie com lâmina



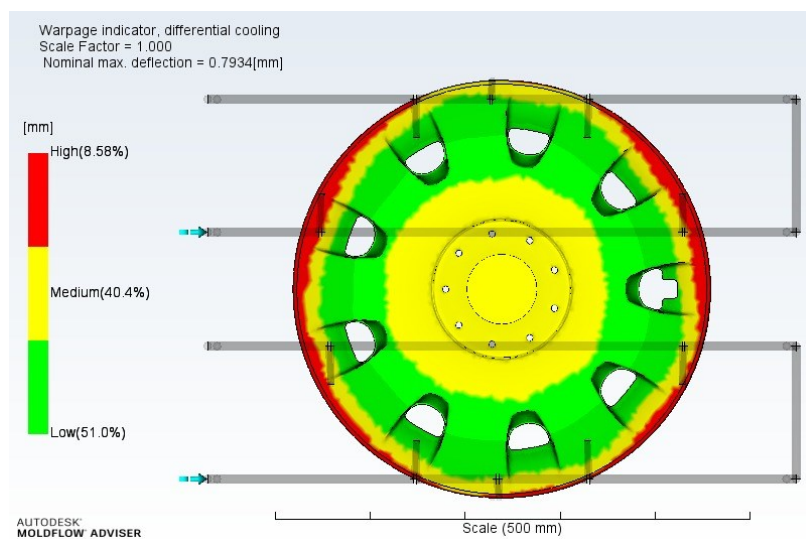
Fonte: Autoria própria

Figura 38 - Contribuição do resfriamento no empenamento da peça com canais de refrigeração em serie com cascata



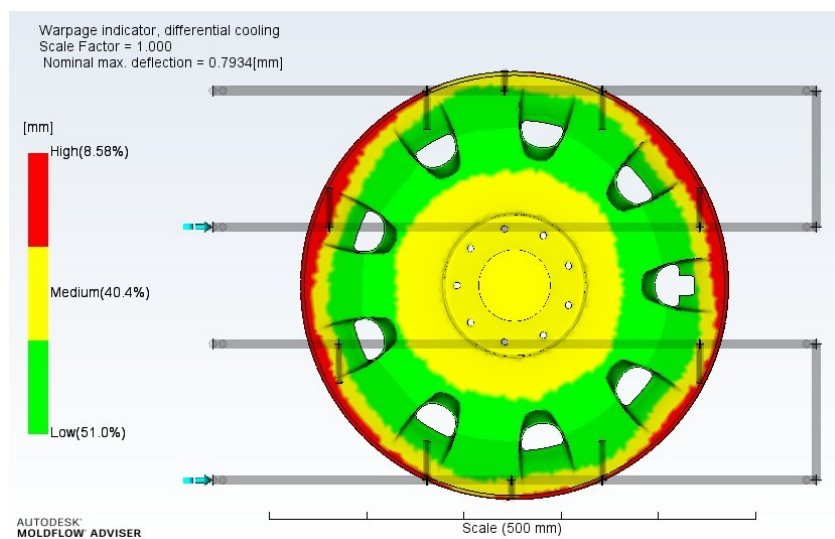
Fonte: Autoria própria

Figura 39 - Contribuição do resfriamento no empenamento da peça com canais de refrigeração em paralelo com lâmina



Fonte: Autoria própria

Figura 40 - Contribuição do resfriamento no empenamento da peça com canais de refrigeração em paralelo com cascata



Fonte: Autoria própria

5 CONCLUSÃO

Após a avaliação dos resultados obtidos na simulação, é possível notar que o uso de lâminas e cascatas, tanto em paralelo quanto em série, para o resfriamento do molde da peça proposta não apresenta vantagens, pois sua utilização implica no uso de uma pressão do circuito de refrigeração maior e também há maior contribuição para o empenamento. O tempo de resfriamento ficou ligeiramente menor, mas essa vantagem não é significativa devido aos contrapontos mencionados anteriormente.

Comparando os canais de refrigeração em série e em paralelo sem lâminas e cascatas observa-se que a configuração em paralelo demanda metade da pressão no circuito de refrigeração e tem um tempo de resfriamento ligeiramente menor, porém há contribuição ligeiramente maior no empenamento da peça.

Conclui-se, portanto, que tanto os canais de refrigeração em série quanto em paralelo apresentaram um bom desempenho, pois há pouca diferença nos valores de tempo e empenamento. Porém como o canal de refrigeração em paralelo apresenta uma diferença significativamente menor na pressão demandada no circuito de refrigeração e tempo de ciclo muito semelhante, este pode ser considerado a melhor opção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIPLAST. **Perfil 2016.** Disponível em: <http://file.abiplast.org.br/download/2016/perfil_2016.pdf>. Acesso em: 30 de Maio de 2018.
- BLASS, A. **Processamento de polímeros.** 2.ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1988. 312p.
- CANEVAROLO JÚNIOR, S. V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros.** 2. ed. São Paulo: Artliber, 2002. 183p.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA J. M. **Mecânica dos fluidos: Fundamentos e aplicações.** 6. ed. São Paulo: AMGH, 2007.
- CORDEBELLO, F. S.. **Polímeros do futuro: tendências e oportunidades. Polímeros**, São Carlos , v. 13, n. 1, p. e4-e43, Jan. 2003 . Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282003000100003&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 28 Maio 2018.
- GUEDES, B., FILKAUSKAS, M. **O plástico.** São Paulo: Érica, 1986. 156p.
- HARADA, J. **Moldes para injeção de termoplásticos: projetos e princípios básicos.** São Paulo: Artliber, 2004. 308 p.
- INCROPERA, F.P., BERGMAN, T.L., DEWITT, D.P., **Fundamentos de transferência de calor e de massa**, 6ª ed., Editora LTC, Rio de Janeiro-RJ, 2008, 643p
- LOPES, J. **Como funciona uma máquina injetora de plástico?** Automata. 09 de novembro de 2016. Disponível em: <<https://www.automataweb.com.br/como-funciona-uma-maquina-injetora-de-plastico/>>. Acesso em: 17 novembro 2020
- MALOY, ROBERT A. **Plastic Part Design for injection molding: An introduction** 2ª ed., Editora Hanser, 2010. 549p.
- MANO, E. B.; MENDES, L. C; **Introdução a polímeros**, 2ª ed., Edgard Blücher Ltda: São Paulo, 2004.
- MANRICH, S. **Processamento de Termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes.** São Paulo: Artliber, 2005. 431p.
- MOLDFLOW PLASTICS ADVISER GUIDE, version 3.0, 2018.
- PARK, H. S., DANG, X. P. **Design and simulation-based optimization of cooling channels for plastic injection mold.** New technologies: trends, innovations and research. InTech, 2012.
- SZETEIOVA, K. **Automotive materials: Plastics in automotive markets today.** Disponível em: <https://www.mtf.stuba.sk/buxus/docs/internetovy_casopis/2010/3/szeteiova.pdf>. Acesso em: 20 de Outubro de 2020.