

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**ANÁLISE COMPARATIVA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA DOS MÉTODOS  
DE SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DE MOLDE DE INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS**

por

Francisco Duarte Secchi

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, fevereiro de 2024

## CIP - Catalogação na Publicação

Secchi, Francisco Duarte

Análise Comparativa Através de Simulação Numérica dos Métodos de Sistema de Refrigeração de Molde de Injeção de Termoplásticos / Francisco Duarte Secchi. -- 2024.

20 f.

Orientador: Felipe Roman Centeno.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto Alegre, BR-RS, 2024.

1. Injeção de termoplásticos. 2. Molde. 3. Simulação numérica. 4. Conformal cooling. 5. Sistema de refrigeração. I. Centeno, Felipe Roman, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Francisco Duarte Secchi

ANÁLISE COMPARATIVA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA DOS MÉTODOS  
DE SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DE MOLDE DE INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Ignacio Iturrioz  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Felipe Roman Centeno

Comissão de Avaliação:

Prof. Felipe Roman Centeno (Presidente)

Prof. André João de Souza

Prof. Guilherme Henrique Fiorot

Prof. Luiz Alberto Oliveira Rocha

Porto Alegre, fevereiro de 2024

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me dar forças e capacidades.

A meus pais, Luís e Marlise, por proporcionarem as condições e me incentivarem durante esse período da graduação.

À minha amada esposa Daniela, por sempre estar ao meu lado e me apoiar em todos os momentos durante essa trajetória.

À empresa STIHL Ferramentas Motorizadas Ltda. e aos meus colegas pelo ambiente de grade aprendizado, especialmente ao Vanderlei Zalamena, por me proporcionar aprendizado e experiência na área de simulação.

A todos meus amigos e familiares que de alguma forma contribuíram com minha jornada.

Secchi, F. D. **Análise Comparativa Através de Simulação Numérica dos Métodos de Sistema de Refrigeração de Molde de Injeção de Termoplásticos**. 2024. 15p. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

## RESUMO

Devido à busca constante em diminuir o tempo de ciclo dos processos de manufatura, o presente trabalho tem como objetivo melhorar a refrigeração de um molde de injeção de termoplástico da empresa STIHL Ferramentas Motorizadas Ltda., realizando simulação numérica utilizando o software SIGMASOFT® para validar as hipóteses. Foram realizadas simulações alterando o material dos postigos do molde e o método de refrigeração, testando tanto o método convencional, obtido através de furos retos usinados, quanto *conformal cooling*, que é obtido através de manufatura aditiva. No caso estudado, ambos os métodos de refrigeração apresentam resultados similares na redução do tempo de solidificação da peça, reduzindo o tempo em 14,6%. A mudança no material de um dos postigos – de aço para liga de cobre-berílio – em conjunto com a aplicação da refrigeração eleva essa redução a 23,5%. Juntamente com o método tradicional de cálculo de refrigerações em moldes de injeção de termoplásticos, a simulação numérica se apresenta como uma ferramenta valiosa para refinar e aprimorar os moldes antes que venham a produzir, possibilitando identificar possíveis melhorias ao molde, trazendo um ganho para a indústria.

**PALAVRAS-CHAVE:** Injeção de termoplásticos. Molde. Simulação numérica. Conformal cooling. Sistema de refrigeração

Secchi, F. D. **Comparative Analysis through Numerical Simulation of Thermoplastic Injection Mold Cooling System Methods.** 2024. 15p. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

## **ABSTRACT**

Due to the constant pursuit of reducing the cycle time of manufacturing processes, this current study aims to enhance the cooling system of a thermoplastic injection mold at STIHL Ferramentas Motorizadas Ltda. by conducting numerical simulations using the SIGMASOFT® software to validate hypotheses. Simulations were performed by altering the material of the mold inserts and the cooling method, testing both the conventional method, obtained through machined straight holes, and conformal cooling, obtained through additive manufacturing. In the studied case, both cooling methods yield similar results in reducing the solidification time of the part, leading to a time reduction of 14.6%. Changing the material of one of the inserts – from steel to copper-beryllium alloy – along with the implementation of the cooling system, increases this reduction to 23.5%. In conjunction with the traditional method of calculating cooling in thermoplastic injection molds, numerical simulation proves to be a valuable tool for refining and improving molds before they enter production, enabling the identification of potential mold enhancements and providing gains for the industry.

**KEYWORDS:** Thermoplastic injection. Mold. Numerical simulation. Conformal cooling. Cooling system.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	FUNDAMENTAÇÃO	3
3	CASO DE ESTUDO	8
3.1	CONFIGURAÇÃO DA SIMULAÇÃO	8
3.1.1	Importação dos Arquivos	8
3.1.2	Configuração da Geometria	9
3.1.3	Geração da Malha	9
3.1.4	Condições de Contorno	9
3.1.5	Definição dos Parâmetros do Processo	10
3.1.6	Definição dos Resultados	10
3.2	TESTE DE CONVERGÊNCIA DE MALHA E VALIDAÇÃO DO SOFTWARE	10
3.3	VERSÕES SIMULADAS	13
4	RESULTADOS	14
5	CONCLUSÃO	15
	REFERÊNCIAS	16
	APÊNDICE A	17
	APÊNDICE B	19
	ANEXO	20

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de materiais poliméricos através do processo de injeção de componentes tem se tornado cada vez mais comum e vem sendo aplicada nas mais diversas atividades, desde os setores automotivo e de materiais cirúrgicos aos de brinquedos e potes (SILVA, 2009). O processo de injeção em moldes para produzir peças plásticas é um dos mais utilizados para essa finalidade, sendo responsável pela fabricação de 32% dos produtos plásticos (NISHIMOTO, 2001). Esse processo permite produzir peças com as mais diversas formas, tamanhos e funcionalidades. O processo consiste em o polímero fundido ser injetado dentro de um molde, onde preenche a cavidade, tomando a forma do molde. Para que possa ser extraída, é necessário que a peça esteja solidificada. Para isso, o polímero troca calor com o molde que, por sua vez, troca calor com o fluido refrigerante que passa por dentro dele.

De acordo com Garcia (2008), os moldes convencionais são compostos por duas placas (móvel e fixa) onde são montados os sistemas funcionais do molde, que são: as cavidades, que são as zonas moldantes que darão a forma ao componente injetado; sistema de alinhamento; sistema de alimentação; sistema de ventagem (saídas de gases ou *vents*); sistema de resfriamento; sistema de extração. As zonas moldantes podem ser compostas por vários componentes conhecidos como postigos, que dão forma ao produto. Dependendo da complexidade geométrica e restrições de fabricação, uma cavidade pode ter mais ou menos postigos para dar forma à peça.

O ciclo de injeção em moldes abrange algumas etapas: fechamento; fase de preenchimento, que abrange a injeção, a pressurização e o recalque, solidificação (resfriamento), abertura e tempo morto (GARCIA, 2008). Para que o componente possa ser extraído do molde, é importante que o sistema de resfriamento retire o calor necessário para que a peça forme uma camada sólida por toda a sua superfície, a fim de que o material fundido não vaze e a peça seja comprometida. A fase de solidificação é a mais longa no processo de injeção, representando mais de 2/3 do tempo total de ciclo (MOLDFLOW CORPORATION, 2006), como mostra a Figura 1.

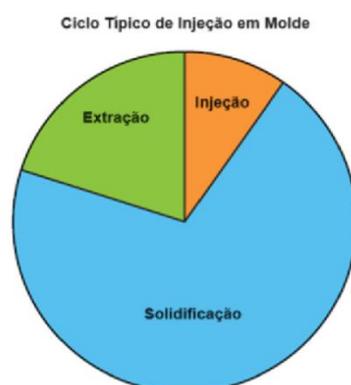


Figura 1 – Ciclo típico de injeção de polímero. Adaptado de: Moldflow Corporation (2006).

Tendo isso em vista, reduzir o tempo de solidificação torna-se uma tarefa importante para reduzir o custo de fabricação dos componentes injetados, visto que o custo da hora-máquina é extremamente elevado e existe uma busca constante pela redução desse tempo na indústria. O tempo de solidificação está diretamente ligado com a geometria da peça e com a capacidade que as linhas de refrigeração têm de retirar calor do molde que, por sua vez, retira o calor do polímero fundido.

Como a projeção de moldes para componentes plásticos com geometria complexa e de seu sistema de resfriamento é uma tarefa complexa e o preço de um molde ser elevado, o

método de tentativa e erro para encontrar o melhor cenário para injetar as peças não é ideal. Com isso, algumas empresas fazem uso de softwares de simulação numérica computacional para prever o comportamento do molde e o ciclo de injeção, podendo assim realizar alterações virtuais para só depois colocar em prática as mudanças, evitando desperdícios de tempo e matéria prima.

O objetivo do presente estudo é comparar os métodos de sistemas de refrigeração através de simulações a fim de encontrar uma melhor condição para a refrigeração de um molde e, conseqüentemente, reduzir o tempo de ciclo da peça injetada, a fim de reduzir seus custos de fabricação.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO

O sistema de refrigeração do molde foi originalmente dimensionado pela ferramentaria da STIHL utilizando os cálculos apresentados por Brito *et al.* (2004), que considera algumas simplificações no modelo para facilitar o projeto. São elas:

- O processo é quase estático;
- As flutuações nas temperaturas e nos fluxos térmicos durante o ciclo são desprezíveis;
- Valores médios das propriedades termofísicas e termomecânicas são consideradas durante os períodos em questão.

O balanço térmico no molde é expresso pela Eq. 1 e 2 (BRITO *et al.*, 2004) e ilustrado pela Figura 2.

$$Q_T = Q_{pol} + Q_{amb} + Q_{resf} = 0 \quad (1)$$

$$Q_{amb} = Q_{cond} + Q_{conv} + Q_{rad} \quad (2)$$

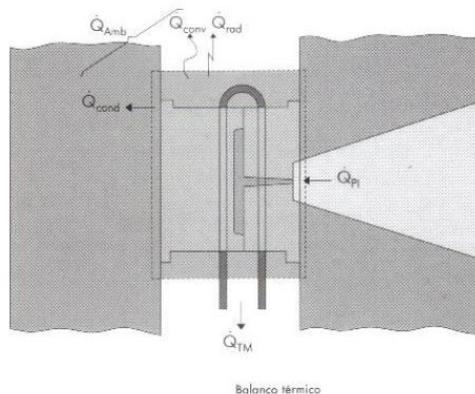


Figura 2 – Esquema do balanço térmico no molde. Fonte: Garcia (2008)

onde  $Q_T$  é o calor total envolvido na moldagem (W),  $Q_{pol}$  é o calor do polímero fundido (W),  $Q_{amb}$  é o calor transferido pelo molde para o ambiente (W),  $Q_{resf}$  é o calor transferido do molde para o sistema de resfriamento (W),  $Q_{cond}$  é o calor transferido por condução para o ambiente (W),  $Q_{conv}$  o calor transferido por convecção para o ambiente (W) e  $Q_{rad}$  o calor transferido por radiação para o ambiente (W). O calor total deve ser igual a 0.

O calor cedido pelo polímero fundido durante o tempo em que a cavidade permanece cheia é expresso pela Eq. 3 (BRITO *et al.*, 2004):

$$Q_{pol} = \frac{m(h_{inj} - h_{ext})}{t_{res}} \quad (3)$$

onde  $m$  é a massa do polímero injetado (kg),  $h_{inj}$  e  $h_{ext}$  são as entalpias do polímero à temperatura de injeção e de extração (J/kg), respectivamente, e  $t_{res}$  o tempo de residência do polímero no molde (s).

O tempo de residência, que é o tempo de resfriamento, é calculado pela Eq. 4 (BRITO *et al.*, 2004):

$$t_{res} = \frac{s^2 \ln(k \cdot Y)}{\pi^2 \alpha_{ef}} \quad (4)$$

onde  $s$  é a espessura da parede da peça (m);  $\alpha_{ef}$  a difusividade térmica efetiva média ( $\mu\text{m}^2/\text{s}$ );  $Y$  é a temperatura adimensional;  $k$  é o coeficiente dependente da espessura da peça,  $4/\pi$  para peças finas ( $s \leq 3$  mm) e  $8/\pi^2$  para peças espessas ( $s > 3$  mm).  $Y$  é dado pela Eq. 5 (BRITO *et al.*, 2004):

$$Y = \frac{T_{inj} - T_{mol}}{T_{mol} - T_{ext}} \quad (5)$$

onde  $T_{inj}$ ,  $T_{mol}$  e  $T_{ext}$  são as temperaturas de injeção, do molde e de extração ( $^{\circ}\text{C}$ ), respectivamente.

O processo de transferência de calor do molde para o ambiente se dá pelos 3 mecanismos: condução, convecção e radiação. O calor transferido por condução se dá para as placas de fixação do molde e pode ser calculado pela Eq. 6 (BRITO *et al.*, 2004)

$$Q_{cond} = A_{fix} \cdot \beta \cdot (T_{amb} - T_{mol}) \quad (6)$$

onde  $A_{fix}$  é a área de contato do molde com o sistema de fixação ( $\text{m}^2$ ),  $\beta$  é o fator de proporcionalidade ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ ) dado em tabelas (ver ANEXO) e  $T_{amb}$  e  $T_{mol}$  as temperaturas do ambiente e do molde ( $^{\circ}\text{C}$ ).

O calor transferido por convecção se dá pela área lateral do molde e é expresso pela Eq. 7 (BRITO *et al.*, 2004):

$$Q_{conv} = A_{lat} \cdot \alpha \cdot (T_{amb} - T_{mol}) \quad (7)$$

onde  $A_{lat}$  é a área lateral do molde exposta ao ambiente ( $\text{m}^2$ ),  $\alpha$  é o coeficiente de transferência de calor para convecção livre do ar ( $15 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ ). Finalmente, o calor transferido por radiação pode ser calculado pela Eq. 8 (BRITO *et al.*, 2004):

$$Q_{rad} = A_{lat} \cdot \varepsilon \cdot C_{rad} \cdot \left( \left( \frac{\theta_{amb}}{100} \right)^4 - \left( \frac{\theta_{mol}}{100} \right)^4 \right) \quad (8)$$

onde  $\varepsilon$  é a emissividade da superfície (0,25 para aço),  $C_{rad}$  é o coeficiente de radiação do molde ( $5,77 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$ ),  $\theta_{amb}$  e  $\theta_{mol}$  as temperaturas absolutas do ambiente e do molde (K), respectivamente.

Com isso, é possível então calcular a quantidade de calor que o sistema de resfriamento necessita retirar do sistema através da Eq. 9 (BRITO *et al.*, 2004):

$$Q_{resf} = -Q_{pol} - Q_{amb} \quad (9)$$

Para determinar a vazão de fluido que passa pelo sistema, fixa-se o aumento de temperatura que o fluido terá durante a passagem por ele. Segundo Brito *et al.* (2004), essa variação deve ser entre 2 e 5°C. A vazão é dada pela Eq. 10 (BRITO *et al.*, 2004):

$$V = \frac{|Q_{resf}|}{c \cdot \Delta T} \quad (10)$$

onde  $c$  é o calor específico do fluido (4,186 kJ/kg·°C para a água) e  $\Delta T$  a variação de temperatura do fluido fixada (°C).

É importante ressaltar que o número de Reynolds deve ser de 4000 ou superior, para que o escoamento do fluido se torne turbulento. Além disso, o número de Reynolds ideal para os circuitos de refrigeração é de aproximadamente 10.000. Valores que acima de 10.000 podem gerar maior consumo de energia pelo sistema de refrigeração, superando os ganhos de transferência de calor (MARQUES *et al.*, 2014). O número de Reynolds é um parâmetro adimensional definido pela Eq. 11 (INCROPERA *et al.*, 2013):

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (11)$$

onde  $V$  é a velocidade do fluido (m/s),  $D$  é o diâmetro do canal de refrigeração (m) e  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido (m<sup>2</sup>/s). Determinada a vazão, obtém-se então o diâmetro recomendado para as linhas do sistema através da Tabela 1:

Tabela 1: Diâmetro dos canais de refrigeração

Vazão (l/min)	Diâmetro (mm)
3,8	8
9,5	11
38	19
85	23,8

Adaptado de: Brito *et al.* (2004)

Alguns autores dão opiniões diferentes sobre os espaçamentos das linhas de refrigeração. Harada (2004) sugere que os furos devem ter uma distância mínima de 25 mm até a parede da cavidade e o passo entre os furos de duas a três vezes esse valor. Já Brito *et al.* (2004) sugere que os canais tenham diâmetros de 6, 8, 10, 11, 14, 16 ou 18 mm e que as distâncias sejam de 0,8 a 2,5 vezes o diâmetro até a superfície e passo de 2,5 a 3,5 vezes o diâmetro. A Figura 3 ilustra os distanciamentos.

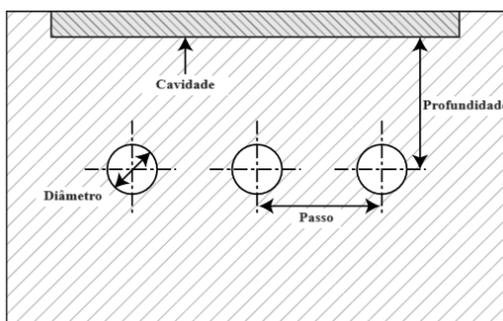


Figura 3 - Distanciamentos entre furos e parede do molde. Adaptado de Moldflow Corporation (2006).

Para o caso de ter que passar linhas de refrigerações por regiões altas e/ou esbeltas, existem algumas técnicas que podem ser empregadas. Uma delas é a de “circuito de águas em cascata com lâmina separadora”. Neste tipo de circuito, uma lâmina fica perpendicular ao fluxo de água, obrigando o fluido a subir e depois descer pelo outro lado da lâmina (GARCIA, 2008). A Figura 6 ilustra o circuito em cascata.

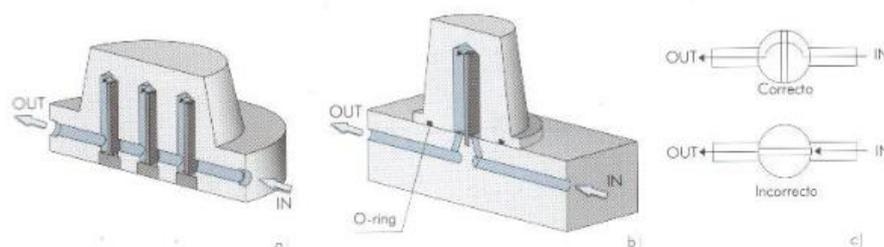


Figura 4 - Circuito de água em cascata com lâminas separadoras. a) lâmina separadora com cabeça roscada; b) lâmina simples; c) montagem correta e incorreta da lâmina separadora. Adaptado de Garcia (2008).

Vale ressaltar a importância da montagem correta da lâmina separadora, visto que se ela não estiver perpendicular ao fluxo, o circuito em cascata perderá a sua eficiência. As regras para distanciamento vistas para os circuitos em geral são válidas para as cascatas também.

Todavia, isso é válido apenas para as refrigerações convencionais – produzidas a partir de furos retos usinados no molde. Para refrigerações do tipo *conformal cooling* – produzidas a partir de impressão 3D do postigo – as distâncias entre os canais e a superfície da cavidade são outras. Segundo Mayer (2009), essas distâncias variam conforme a Tabela 2 e estão representadas na Figura 7.

Tabela 2: Distâncias e dimensões dos furos da refrigeração

Espessura da parede do produto (mm)	Diâmetro do furo (mm) b	Passo (mm) a	Profundidade dos furos (mm) c
0 – 2	4 – 8	2 – 3b	1,5 – 2b
2 – 4	8 – 12	2 – 3b	1,5 – 2b
4 – 6	12 – 14	2 – 3b	1,5 – 2b

Fonte: Mayer (2009)

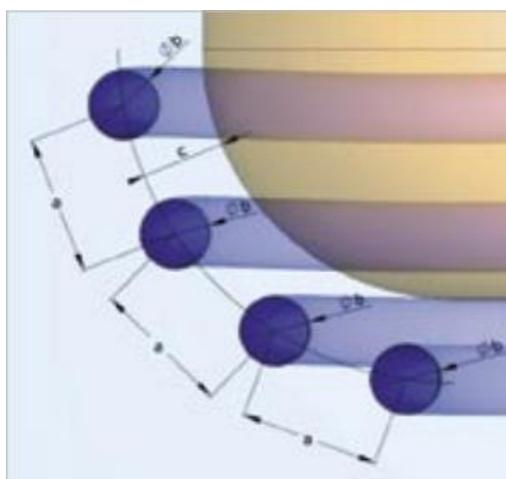


Figura 5 - Distâncias para sistema de refrigeração conformal cooling. Fonte: Mayer (2009)

onde “a” representa o passo entre os centros das linhas, “b” o diâmetro das linhas e “c” a profundidade em relação a superfície da cavidade. Essas distâncias são preferíveis; porém, como explica Mayer (2009), na prática muitas vezes não é possível seguir estritamente essa regra devido às limitações geométricas do molde (como quando passam perto de furos de pinos extratores ou paredes finas).

Entretanto, esses cálculos utilizados para a projeção do molde podem não capturar alguns detalhes que pode haver quando o molde possui uma maior complexidade, como é o caso do molde em estudo. Para isso a simulação numérica computacional pode ser extremamente útil, podendo ajudar a prever pontos quentes no molde e permitindo que sejam solucionados com um menor custo.

O software empregado no presente estudo foi o SIGMASOFT® Virtual Molding 6.0, desenvolvido pela empresa alemã MAGMA Gießereitechnologie GmbH, que é um software CAE (Computer Aided Engineering) comercial de código fechado dedicado a simular o processo de injeção de polímeros. Ele é capaz de simular todo o processo de injeção de polímeros, desde o preenchimento da cavidade até o resfriamento da peça depois de extraída e sua deformação. Para isso, ele faz uso do método de volumes finitos (MFV) para calcular as equações de Navier-Stokes, equações de conservação de massa, energia e momentum, equações de transferência de calor por condução, convecção e radiação, equação de transporte da viscosidade – utilizando os modelos de Ostwald-deWaele e Carreau-Yasuda (LIPINSKI; STEINBACH, [s. d.]; HEPP; LIPINSKI; STEINBACH, [s. d.]). Para realizar a simulação, ele considera o polímero fundido como um fluido newtoniano generalizado (GNF) e incompressível (LIPINSKI; STEINBACH, [s. d.]). Um GNF é um fluido cuja taxa de cisalhamento depende somente do instante de tempo atual, ou seja, não há memória ou histórico na taxa de cisalhamento (HOHENEGGER, [s. d.]). Além disso são feitas algumas considerações como:

- A temperatura ambiente é constante;
- Enquanto fechado, troca de calor do molde com o ambiente é feita por toda a área externa dele;
- Enquanto aberto, a troca de calor do molde com o ambiente é feita por toda área que não está em contato com o produto;
- A troca de calor do molde com o ambiente é feita apenas por convecção e radiação.

### 3 CASO DE ESTUDO

Neste trabalho, será estudado o caso de um molde de injeção de plástico em que um de seus postigos da placa móvel não resfria adequadamente, limitando a transferência de calor da peça na região em contato com ele e, conseqüentemente, o tempo de solidificação. A Figura 6 apresenta o perfil térmico do lado móvel do molde no momento do início do ciclo, que foi obtido através de simulação numérica. É possível observar que há uma região no molde (postigo) que apresenta uma temperatura superior à do resto da cavidade. Isso ocorre devido à deficiência na refrigeração do molde na região. Esse caso foi notado enquanto realizava-se simulações de rotina para a liberação do molde na empresa.

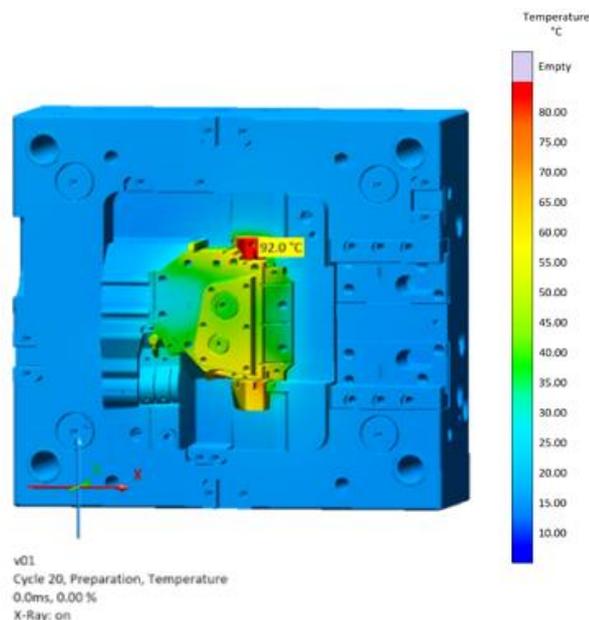


Figura 6 - Perfil térmico do molde em estudo. Fonte: o autor

A Figura 7 mostra o molde que está com transparência (para mostrar na parte interna os extratores e o sistema de refrigeração), onde o postigo em estudo está grifado na cor rosa, as canalizações nas cores laranja e azul são os canais de refrigeração do molde e os cilindros esbeltos na cor cinza são os pinos extratores.

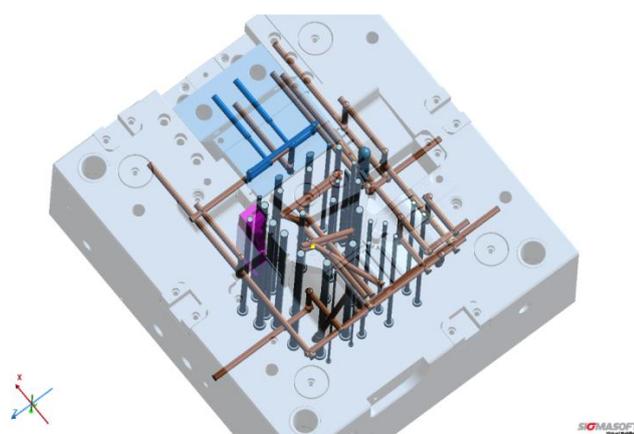


Figura 7 – Molde de injeção da peça a ser estudada. Fonte: o autor

A ausência de refrigeração no postigo em estudo acontece por haver um pino extrator passando no meio dele, o que é um limitante para poder usar uma refrigeração passando perto. Conforme explica Marques *et al.* (2014), uma forma de contornar esse tipo de situação é fazendo uso de *conformal cooling*, através de manufatura aditiva do postigo com os canais de refrigeração, permitindo assim uma maior liberdade geométrica para os canais, não sendo limitados a furos retos. Uma das técnicas de manufatura aditiva que é aplicada na indústria é a fusão seletiva a laser (SLM), que é capaz de produzir objetos com geometrias complexas e propriedades mecânicas semelhantes à dos materiais comumente usados na fabricação de moldes de injeção de termoplásticos (VOLPATO *et al.*, 2017).

A peça que será estudada neste trabalho é produzida em polipropileno (também conhecido como PP). Nessa peça, a simulação indica que a região em contato com o postigo citado é a que mais demora para solidificar, limitando dessa forma o tempo de ciclo pois,

estando o material líquido em contato com a parede do molde, não é possível realizar a extração do componente. Importante ressaltar que não faz parte desse estudo a aplicação prática das soluções encontradas.

Para a realização do estudo, primeiramente, foi estabelecido que o produto não sofreria alterações, tanto na geometria quanto no material. Além disso, a aplicação de mudanças no molde fica restrita aos postigos menores, denominados de “postigo 1” e “postigo 2”. O postigo maior da cavidade será denominado “inserto”. A Figura 8 ilustra os postigos 1 e 2.

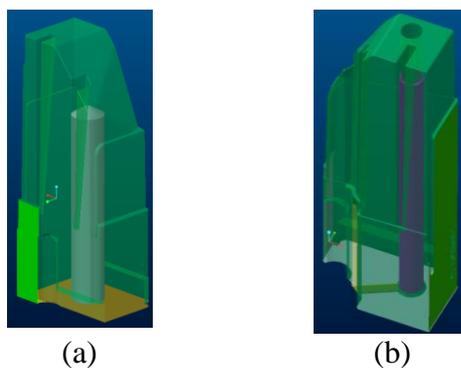


Figura 8 – (a) Postigo 1; (b) Postigo 2. Fonte: o autor

O postigo 2 é o já referido postigo que apresenta uma temperatura superior em relação ao resto do molde e onde o produto leva maior tempo para solidificar. Nota-se o furo por onde passa o pino extrator, destacado em roxo na Figura 7. O postigo 1 fica no lado oposto do produto e não apresenta tal problema, pois há uma refrigeração do tipo cascata que faz o resfriamento do postigo, destacado em cinza na Figura 7. Observa-se que as geometrias de ambos os postigos possuem similaridade. Ambos os postigos foram originalmente fabricados em aço XPM-42. Para chegar ao resultado, algumas simulações foram realizadas, fazendo alterações no material dos postigos e na refrigeração do postigo 2, testando diferentes geometrias de *conformal cooling* e refrigeração convencional.

### 3.1 Configuração da Simulação

Para que as simulações pudessem ser realizadas, foi necessário primeiramente realizar o pré-processamento das geometrias e depois configurá-la dentro do SIGMASOFT. O processo de configuração da simulação será descrito nos itens a seguir.

#### 3.1.1 Importação dos arquivos

As geometrias utilizadas na simulação foram importadas a partir do projeto do molde no Creo Parametrics 8.0, software CAD (Computer Aided Design) utilizado para projetar o molde, seus componentes e o produto. Nele foram também realizadas as criações e mudanças nas geometrias das refrigerações. Foram selecionadas as partes do molde consideradas importantes para a simulação e exportadas para o SIGMASOFT no formato .stp (STEP). Todas as modificações realizadas na geometria das refrigerações foram modeladas no Creo Parametrics.

#### 3.1.2 Configuração da geometria

Nessa etapa, a geometria é importada para dentro do SIGMASOFT, onde as diversas geometrias que compõem o molde são separadas em grupos, os quais recebem IDs que servirão para definir a malha para cada região, o material para cada parte e as condições de contorno. As geometrias foram divididas em quatro grupos principais: lado fixo, lado móvel,

refrigeração e produto. O lado fixo abrange todos os componentes do lado fixo do molde (porta cavidade, cavidade, réguas, batentes etc.). O lado móvel, da mesma forma que o fixo, abrange os componentes do lado móvel do molde, incluindo os dois postigos em análise. O grupo refrigeração é onde ficam agrupadas as refrigerações, sendo separadas em refrigeração do lado móvel e do lado fixo. Já o grupo do produto, é composto pelo canal de injeção, pelo canal de ataque e pelo produto propriamente dito. Além disso, nessa etapa do processo de configuração é onde são definidas as posições das saídas de gás (sistema de ventagem) e definido também o ponto de injeção.

### 3.1.3 Geração da malha

Nessa etapa é gerada a malha de todo o sistema. Para isso, o software dispõe de três métodos para geração de malha: *classic* (clássico), *minimal wall thickness* (menor espessura de parede) e *equidistant* (equidistante). O utilizado nesse projeto foi o método clássico para tudo, com exceção do canal de ataque, que foi utilizado o método equidistante. No método equidistante, são definidos os tamanhos dos elementos nas três direções e todos os elementos terão o tamanho definido. No método clássico, alguns parâmetros são definidos pelo usuário para que o software gere a malha. Uma explicação de cada parâmetro pode ser vista no APÊNDICE A. A Figura 9 ilustra a malha utilizada no projeto.

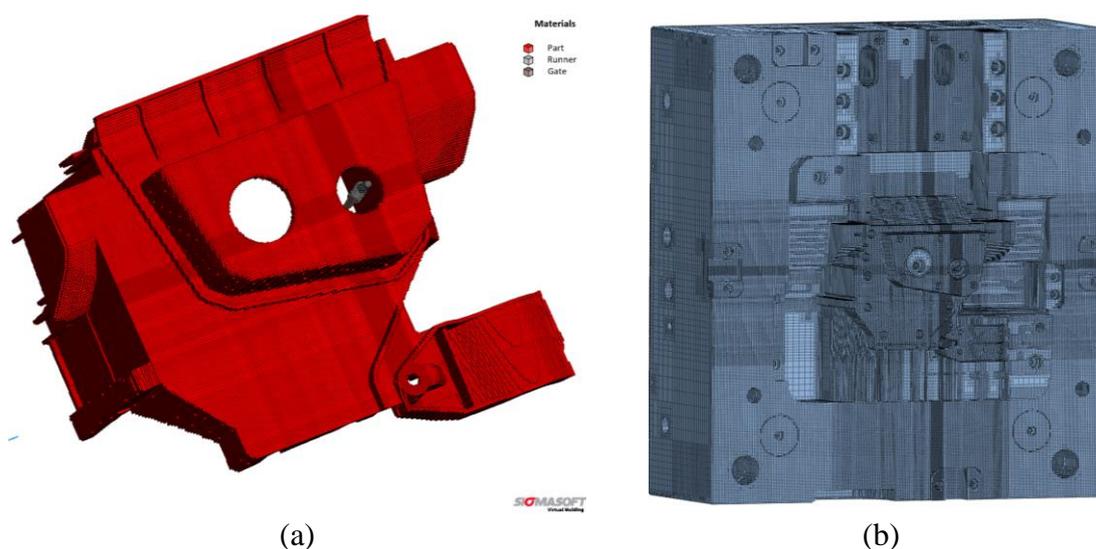


Figura 9 – (a) malha do produto; (b) malha do molde. Fonte: o autor

Nota-se que a malha do produto em algumas regiões possui elementos menores devido ao sistema de canais possuir um maior refinamento. Além disso, a malha do molde sofre engrossamentos quando mais se afasta da região do produto.

### 3.1.4 Condições de Contorno

Depois de gerada a malha, são definidas as condições de contorno para os materiais do molde e do produto. São definidos os materiais utilizados em cada ID criado durante a configuração da geometria. Para isso, utiliza-se um banco de dados do software que tem os *datasets* dos materiais. Cada material tem um *dataset* diferente, que inclui propriedades físico-químicas dele como, por exemplo, condutividade térmica, massa específica, calor específico, curvas de viscosidade etc. Além do material, são definidos também os HTC's para a interface de cada dois IDs diferentes. HTC é o coeficiente de troca de calor. Ele descreve o quão bem um material transfere calor para outro. São definidas também as temperaturas iniciais das partes do molde e das refrigerações e temperatura de injeção do polímero.

### 3.1.5 Definição dos Parâmetros do Processo

Após definidas as condições de contorno dos materiais, são definidos os parâmetros do processo, ou seja, os tempos de cada etapa e as pressões de injeção e recalque.

Nessa etapa também é definido se o software irá considerar fluxo pelas linhas de refrigeração. Se não for considerado, o software recorre a uma simplificação no cálculo, na qual ele calcula a troca de calor com as refrigerações apenas por condução, utilizando como base para isso a temperatura inicial, o diâmetro da linha, a vazão de fluido e o comprimento de linha para utilizar uma condutividade térmica que leve a um resultado de troca de calor semelhante ao resultado caso fosse considerada convecção forçada. Se for considerado fluxo, o software calcula a troca de calor por convecção forçada. Isso é feito devido ao custo computacional para calcular as trocas de calor por convecção ser maior do que o de calcular as por condução, fazendo com que a ativação do fluxo aumente consideravelmente o tempo de simulação. Para o caso das linhas de refrigeração mais distantes da região de análise, o fluxo pelas linhas não foi considerado. Nas refrigerações dos postigos, foi considerado o fluxo. O fluido utilizado em todas as linhas foi água a 20°C.

### 3.1.6 Definição dos Resultados

Depois de configurado o processo, selecionam-se quais resultados o usuário quer que o programa salve na simulação. Não é possível ver nem escolher as equações que o software utilizará para realizar os cálculos.

## 3.2 TESTE DE CONVERGÊNCIA DE MALHA E VALIDAÇÃO DO SOFTWARE

Para garantir a independência dos resultados em relação a malha utilizada e estimar o desvio entre o valor calculado e o valor assintótico que seria obtido com uma malha com elementos infinitesimais, foi realizado um teste de convergência de malha para determinar o GCI (Índice de Convergência de Malha). Para isso, a mesma simulação foi executada utilizando três malhas diferentes, alterando-se apenas os parâmetros *Geometry filter* e *Minimal element size* do grupo *Very Fine*, que é o grupo que abrange o ID do produto, e com isso o número de elementos. A grandeza utilizada para o cálculo foi a temperatura média do postigo 2 no momento da extração da peça. A Fig. 10 mostra a temperatura média para cada versão, onde a versão “1” é a refinada, a “2” é a intermediária e a “3” é a grosseira.

Design	Temperature1 (-)
(13) Versão 1	86.36
(10) Versão 2	87.59
(12) Versão 3	90.47

Figura 10 – Temperatura média para cada versão. Fonte: o autor

Na Fig. 10, as versões estão organizadas da com a menor temperatura média para a maior, sendo que também estão organizadas da mais para a menos refinada. Na Tabela 3 está apresentado o valor dos parâmetros de refinamento de malha utilizados e o número de células do produto (cavidade) e o total.

Tabela 3: Valor dos parâmetros de refinamento e número de células para cada malha

Refinamento	Geometry Filter	Minimal element size	Células da cavidade	Células total
Grosseiro (v3)	3,0	1,0	371.438	5.180.668
Intermediário (v2)	2,4	0,8	453.168	6.223.610
Refinado (v1)	1,2	0,4	1.830.858	13.305.745

Fonte: o autor

Como mostra a Tabela 3, o refinamento foi feito de forma desigual entre uma versão e outra. Por essa razão, para calcular o GCI, foi utilizado o método apresentado por Celik *et al.* (2008). O método consiste em cinco passos, conforme explicado pelos autores: definir o tamanho representativo da malha  $h$ , onde  $h$  foi calculado pela Eq. 11 para uma malha tridimensional; rodar três simulações com tamanhos de malhas diferentes para determinar uma variável importante para o estudo; calcular a ordem aparente  $p$  resolvendo a Eq. 12, fazendo  $h_1 < h_2 < h_3$  e  $r_{21} = h_2/h_1$ ,  $r_{32} = h_3/h_2$ ; calcular os valores extrapolados  $\phi_{ext}^{21}$  a partir de Eq. 13; calcular os erros estimados resolvendo Eq. 14.

$$h = \left[ \frac{V}{N} \right]^{1/3} \quad (11)$$

$$p = \frac{1}{\ln(r_{21})} |\ln|\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21}| + q(p)| \quad (12a)$$

$$q(p) = \ln \left( \frac{r_{21}^p - s}{r_{32}^p - s} \right) \quad (12b)$$

$$s = 1 \cdot \text{sgn}(\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21}) \quad (12c)$$

$$\phi_{ext}^{21} = (r_{21}^p \phi_1 - \phi_2) / (r_{21}^p - 1) \quad (13)$$

$$e_a^{21} = \left| \frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_1} \right| \quad (14a)$$

$$e_{ext}^{21} = \left| \frac{\phi_{ext}^{12} - \phi_1}{\phi_{ext}^{12}} \right| \quad (14b)$$

$$GCI_{fine}^{21} = \frac{1,25 e_a^{21}}{r_{21}^p - 1} \quad (14c)$$

onde  $V$  é o volume total simulado (molde e produto),  $N$  é o número de elementos da versão,  $\varepsilon_{32} = \phi_2 - \phi_3$ ,  $\varepsilon_{21} = \phi_1 - \phi_2$ , e  $\phi_n$  é o valor da variável em analisada na  $n$ -ésima malha,  $e_a^{21}$  o erro relativo aproximado,  $e_{ext}^{21}$  o erro relativo extrapolado e  $GCI_{fine}^{21}$  o índice de convergência de malha. Os valores utilizados para o cálculo do GCI e os encontrados através da aplicação do método estão apresentados no APÊNDICE B.

O baixo valor do  $GCI_{fine}^{21}$  indica que o resultado obtido com a malha refinada está muito próximo do valor exato. Além disso, observa-se a diferença no resultado extrapolado para o da malha intermediária também é baixa, indicando que o uso dela não trará prejuízo para os resultados.

Para a realização da validação do software, foi utilizado como exemplo o molde de uma outra peça plástica produzida na fábrica, devido ao fato de o molde estudado ainda não estar produzindo em série. Essa peça é produzida em PA6 (poliamida 6) e tem tempo de ciclo diferente. Foi simulado o processo de fabricação dessa peça e também capturadas imagens

térmicas utilizando uma câmera termográfica FLIR T530. A Fig. 11 mostra a imagem térmica e o perfil térmico da peça após a extração.

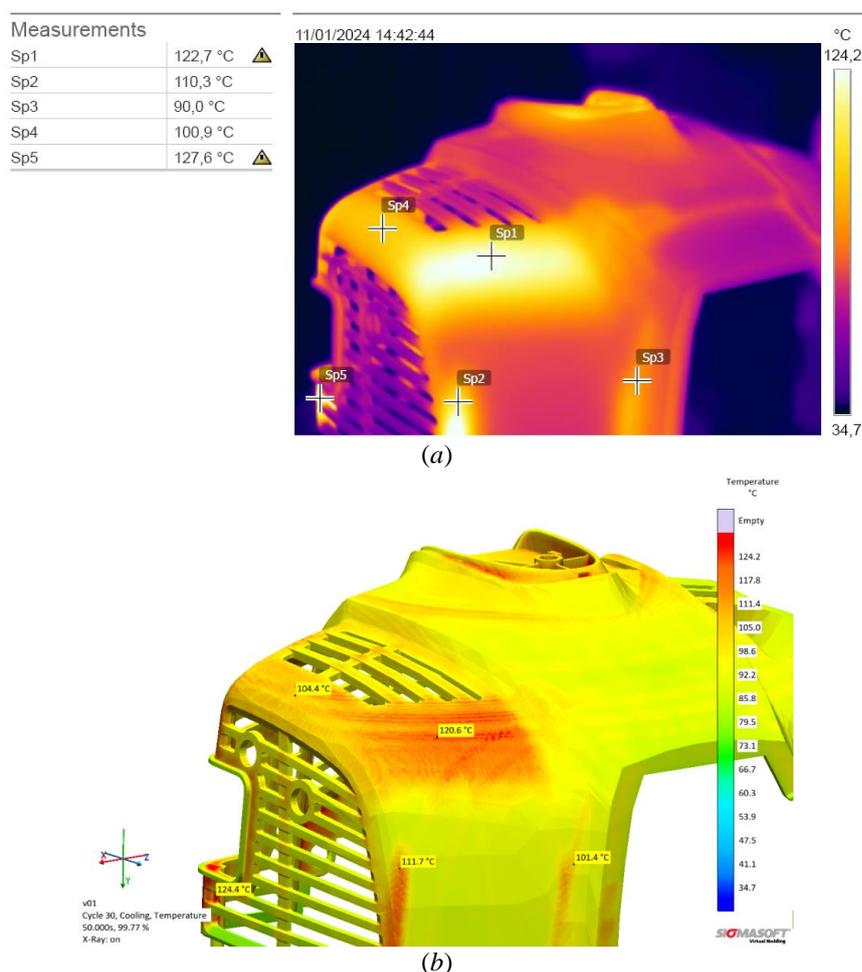


Figura 11 – (a) imagem térmica; (b) perfil térmico simulado. Fonte: o autor

Nota-se pelas imagens que os perfis térmicos se assemelham. Importante ressaltar que, devido a forma de funcionamento da câmera termográfica, regiões não perpendiculares à lente da câmera sofrem uma distorção na leitura da temperatura. Por esse motivo, os pontos selecionados para comparar com o software foram os mais perpendiculares à câmera possível. A Tabela 4 mostra o erro relativo ( $ER$ ) calculado para cada ponto analisado. O erro relativo foi calculado utilizando a Eq. 15.

$$ER = \frac{|Imagem\ Térmica - Simulado|}{Simulado} \times 100 \quad (15)$$

Tabela 4: Temperaturas das imagens térmicas e simuladas e o erro relativo

	Ponto	Imagem Térmica (°C)	Simulado (°C)	ER (%)
<b>Peça</b>	1	122,7	120,6	1,74
	2	110,3	111,7	1,25
	3	90,0	101,4	11,24
	4	100,9	104,4	3,35
	5	127,6	124,4	2,57

Fonte: o autor

O erro obtido foi considerado aceitável, devido à proximidade dos resultados calculados pelo software e os capturados pela câmera. Sendo assim, o software foi considerado adequado para realizar a análise feita no presente estudo.

### 3.3 VERSÕES SIMULADAS

Algumas versões diferentes foram simuladas, alterando o material dos postigos 1 e 2, a geometria da refrigeração no postigo 2, a existência ou não da refrigeração no postigo 2, a existência ou não do furo do pino extrator no postigo 2, alteração nos parâmetros do processo etc. Os materiais utilizados nos postigos para as simulações foram o XPM-42, o maraging (CL 50WS) e AMPCOLOY® 83, sendo que para o caso do XPM-42 foi utilizado um material semelhante: o GS18CrMo9-10. O XPM-42 é o material utilizado atualmente em toda a cavidade do molde. O maraging é o material utilizado na manufatura aditiva do postigo e o AMPCOLOY® 83 é uma liga de cobre-berílio, mais condutivo que o XPM-42, utilizado em moldes de injeção de plástico. A Tabela 5 mostra algumas das propriedades físicas dos três materiais utilizados na simulação.

Tabela 5 - Propriedades físicas dos materiais utilizados

Material	Condutividade térmica a 100°C [W/m·K]	Massa específica a 100°C [g/cm³]	Calor específico 100°C [J/kg·K]
GS18CrMo9-10	35,2	7,820	496
CL 50WS	15,34	8,042	450
AMPCOLOY®83	130,0	8,260	380

Fonte: o autor

Verifica-se a grande diferença da condutividade térmica dos materiais, sendo o AMPCOLOY® cerca de 3,5 a 9 vezes mais condutivo que os outros e o maraging, material utilizado em conjunto com o *conformal cooling*, tendo uma condutividade duas vezes menor que o material atual. Além da alteração no material dos postigos, foram realizadas simulações aplicando *conformal cooling* no postigo 2. Foi também simulada a hipótese retirando o pino extrator e utilizando uma refrigeração em cascata no postigo 2 (similar ao que existe no postigo 1). A Fig. 12 apresenta o postigo 2 com ambos os métodos de refrigeração modelados.

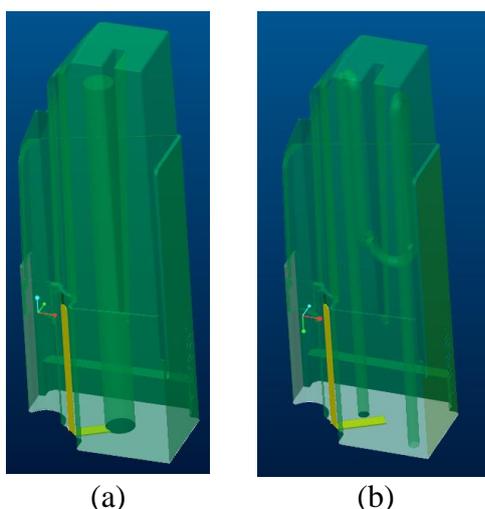


Figura 12 - (a) Refrigeração convencional. (b) *Conformal cooling*. Fonte: o autor

A refrigeração convencional foi modelada respeitando as tolerâncias já mencionadas, tendo um diâmetro de 9 mm. O *conformal cooling* foi também modelado respeitando as distâncias já referidas, com um diâmetro de 3 mm.

#### 4 RESULTADOS

As simulações realizadas mostram que a remoção do pino extrator que passa no centro do postição 2 não traz nenhuma perda para o processo. A Figura 13 ilustra o perfil de pressão de contato da peça com a cavidade e os extratores.

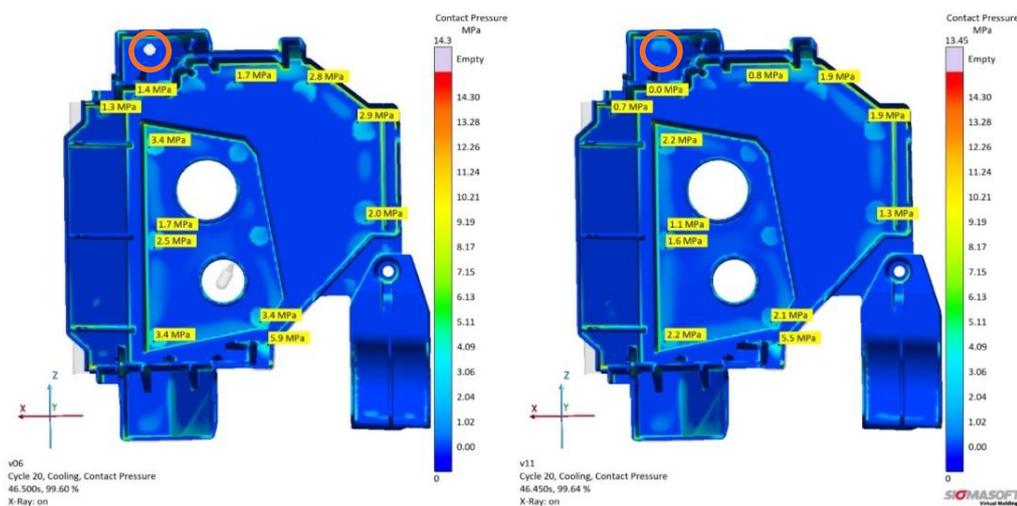


Figura 13 - Perfil de pressão na peça. Em destaque, circulado em laranja, tem-se a área de onde foi retirado o extrator. Na esquerda, sem o extrator. Na direita, com o extrator. Fonte: o autor

Nota-se que a pressão de contato nos extratores próximos ao extrator em questão (os extratores da parte esquerda superior do produto) não sofreu um grande aumento, o que indica que a remoção dele pode ser feita sem causar prejuízo ao produto no momento da extração. Foram então analisadas as simulações com alteração nas geometrias das refrigerações e no material dos postições, já com o postição 2 sem o furo para o pino extrator. Foram consideradas para análise comparativa cinco versões simuladas, além da inicial. A Tabela 6 mostra as características de cada uma das versões alternativas.

Tabela 6 - Material e tipo de refrigeração utilizado em cada versão

Versão	Material Postição 1	Material Postição 2	Tipo de refrigeração Postição 2
1	GS18CrMo9-10	CL 50WS	Conformal cooling
2	GS18CrMo9-10	GS18CrMo9-10	Convencional
3	GS18CrMo9-10	AMPCOLOY® 83	Convencional
4	AMPCOLOY® 83	AMPCOLOY® 83	Convencional
5	AMPCOLOY® 83	GS18CrMo9-10	Convencional

Fonte: o autor

Essas simulações mostraram que, tanto a refrigeração convencional quanto o *conformal cooling* conseguiram extrair calor de forma satisfatória, de modo que o tempo de ciclo foi reduzido em aproximadamente 14,6%. Além disso, o tempo foi reduzido ainda mais com a mudança do material do postição 1. A Fig. 14 mostra o instante em que a peça pode ser extraída em cada versão. As regiões coloridas com os números 1 (verde) e 2 (laranja) representam a área onde ficam os postições 1 e 2.

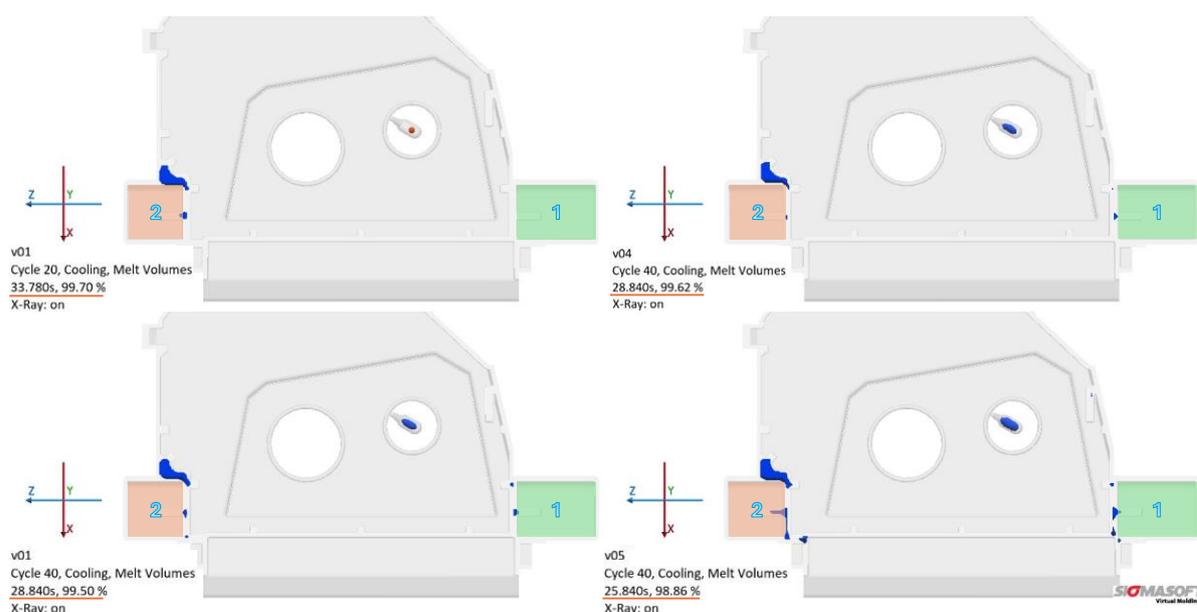


Figura 14 – Comparação da massa líquida nas versões simuladas. Esquerda superior: inicial; direita superior: conformal cooling no posticho; esquerda inferior: refrigeração convencional no posticho 2; direita inferior: refrigeração convencional no posticho 2 e posticho 1 em AMPCOLOY. Fonte: o autor

Observa-se no corte que a região em azul não está em contato com a superfície do produto, indicando a possibilidade de extração. Isso ocorre, tanto no caso com *conformal cooling* quanto no caso com refrigeração convencional no posticho 2, com 28,84 s, enquanto antes da inserção de refrigeração ocorria em 33,78 s. Notou-se porém que, para tempos menores que 28,84 s, a restrição passou a ser a massa líquida na região próxima ao posticho 1. Assim, alterando o material do posticho 1 para AMPCOLOY® 83, o tempo de ciclo foi reduzido para 25,84 s. Com essa alteração, a redução do tempo de ciclo chegou a aproximadamente 23,5%, com relação ao tempo inicial.

## 5 CONCLUSÃO

Este estudo possibilitou chegar a uma condição satisfatória de redução de tempo de ciclo de até 23,5%, devendo-se realizar testes no chão de fábrica para validar essas simulações. Importante ressaltar que a fabricação de postichos em AMPCOLOY® 83 ou por impressão 3D tem um custo muito mais elevado do que os construir em aço XPM-42 (aproximadamente 5 vezes o valor). Por isso, para determinar qual seria a melhor solução, seria necessário entender quais os planos de investimento e a necessidade da fábrica para viabilizar uma solução ou outra, sendo os melhores cenários os das versões 2 e 5.

Conclui-se que, nesse caso, a aplicação de *conformal cooling* não seria a melhor escolha, visto que a aplicação de refrigeração convencional no posticho 2 já resolveria o problema de resfriamento no local, embora em alguns casos seja visto uma melhora com a aplicação do *conformal cooling*. Contudo, para a aplicação da refrigeração convencional, é necessária a retirada do pino extrator, que só foi possível validar a hipótese por ter sido feita a simulação dela, uma vez que o preço de fabricação de um posticho é elevado para aplicar método de tentativa e erro.

Além disso, viu-se que a simulação numérica é uma ferramenta valiosa para tratar de casos como o estudado, otimizar o processo e economizar recursos, visto que os cálculos comumente utilizados trazem uma boa aproximação, mas por tratar do molde como um todo, acabam deixando detalhes importantes de lado.

## REFERÊNCIAS

- BRITO, A. M. et al. **Manual do Projectista para moldes de injeção de plástico**. Marinha Grande, Portugal: CENTIMFE - Centro Tecnológico da Indústria de Moldes, Ferramentas Especiais e Plásticos, 10v. 2004.
- CELIK, I. B. *et al.* Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. **ASME Journal of Fluids Engineering**, [s. l.], vol. 130, jul. 2008. Disponível em: <http://fluidsengineering.asmedigitalcollection.asme.org/>. Acesso em: 18 jan 2024
- GARCIA, M. C. R. **FUNDAMENTOS DE PROJETO DE FERRAMENTAS**. Sapucaia do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil: CEFET-RS, 2008.
- HARADA, J. **Moldes para Injeção de Termoplásticos: projetos e princípios básicos**. São Paulo: Artliber Editora, 2004
- HOHENEGGER, C. **Math 6750**. Salt Lake City, UT: University of Utah, [s. d.]. Lecture 3
- INCROPERA, F. P. *et al.* (org.). **Principles of heat and mass transfer**. 7. ed., international student versioned. Hoboken, NJ: Wiley, 2013.
- LIPINSKI, D. M.; STEINBACH, J. **Three-Dimensional Simulation of Injection Moulding Process Including Fiber Orientation**. Aachen, Germany: MAGMA GmbH, [s. d.]
- LIPINSKI, D. M.; STEINBACH, J.; HEPP, E. **Novel numerical algorithm for semi-solid processing of complex castings**. Aachen, Germany: MAGMA Gießereitechnologie, [s. d.]
- MARQUES, S.; SOUZA, A. F.; SANTOS, R. F. F. **Análise da influência do Conformal Cooling em um molde de injeção de plástico comparado com a refrigeração convencional por simulação de transferência de calor**. Revista E-Tech: Tecnologias para Competitividade Industrial - ISSN - 1983-1838, Florianópolis, v. 7, n. 2, p. 69–82, 2014.
- MAYER, S. **Optimised mould temperature control procedure using DMLS**. Krailling/Munich, Germany: EOS GmbH, 2009
- MOLDFLOW CORPORATION. **Moldflow Design Guide: a resource for plastic engineers**. 1st. ed. Framingham, Massachusetts, U.S.A: Jay Shoemaker, 2006.
- NISHIMOTO, A. R. **Simulação Numérica da Injeção de Termoplásticos em Moldes: estudo comparativo de alguns modelos computacionais**. 2001. - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- SILVA, S. L. **Sistemática para o Projeto do Sistema de Refrigeração de Moldes para Injeção de Polímeros**. 2009. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- VOLPATO, N. et al. **Manufatura Aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo, SP, Brasil: Blucher, 2017.

## APÊNDICE A – PARÂMETROS DE GERAÇÃO DA MALHA

### Geometry filter

O software escaneia a geometria com passos iguais ao tamanho do *Geometry filter*. Se a dimensão perpendicular à direção do escaneamento mudar de um passo para o outro, um plano de malha é criado. Ele coloca um elemento de malha entre dois planos de malha. Uma vez que esse parâmetro é uma tolerância geométrica, detalhes menores que o valor dos parâmetros não são representados na malha. É possível definir um valor para cada direção (x, y e z).

### Subdivisions e Minimal Element Size

Após a etapa do *Geometry filter*, a malha é então refinada. Cada elemento é subdividido em elementos menores, conforme o valor definido em *Subdivisions*. Porém, a divisão dos elementos é limitada por *Minimal Element Size*. Se os elementos criados forem menores do que o valor definido em *Minimal Element Size*, menos elementos serão criados nesta região da malha, ou seja, o número de subdivisões é reduzido até que o tamanho de elemento resultante seja maior ou igual ao tamanho definido em *Minimal Element Size*. Para o caso de simulações de preenchimento e solidificação, a empresa desenvolvedora recomenda o uso de *Subdivisions* igual a três. Para facilitar para o software gerar a malha mais uniformemente, costuma-se utilizar o *Minimal Element Size* (valor de subdivisões) três vezes menor que o *Geometry filter*.

### Maximum Length Ratio e Maximum Aspect Ratio

Depois do refinamento realizado, a malha é nivelada tanto em relação à razão de aspecto entre os elementos vizinhos quanto à forma dos elementos individuais da malha. Isso é feito a fim de assegurar resultados estáveis na simulação. O *Maximum aspect ratio of an element* impede que células extremamente finas ou planas sejam formadas, estabelecendo um limite superior para a razão de aspecto de elementos individuais da malha. Ou seja, se a razão de aspecto entre duas dimensões de um elemento for maior que *Maximum aspect ratio of an element*, o elemento é subdividido. A Figura 15 ilustra o processo de subdivisão do *Maximum aspect ratio of an element*.



Figura 15 - Elemento com razão de aspecto maior que o parâmetro sendo subdividido. Fonte: MAGMA

Observa-se que, o elemento estava com uma dimensão muito maior que a outra, fazendo com que a razão de aspecto fosse maior que o valor definido, ocasionando na subdivisão do elemento.

O *Maximum length ratio of neighboring elements*, por sua vez, limita a variação no tamanho de uma célula em relação à vizinha. Isso vale para todas as direções. Ele funciona como um parâmetro suavizador. Da mesma forma que o *Maximum aspect ratio of an element* faz para dentro de um elemento individual, se a razão de comprimento entre os elementos vizinhos for maior que o valor definido, o maior elemento entre os dois é subdividido. A Figura 16 ilustra o processo de subdivisão do *Maximum length ratio of neighboring elements*.



Figura 16 - Elemento com dimensão muito maior que a do vizinho. Fonte: MAGMA

Nota-se que, a dimensão indicada na imagem do elemento à esquerda era muito maior que a do elemento à direita, fazendo com que o elemento à esquerda fosse subdividido, gerando dois elementos no lugar, com dimensões muito mais próximas às do elemento à direita. Isso faz com que haja uma maior suavidade na malha.

Ambos os parâmetros são aplicados a todas as direções. Os valores utilizados para esses parâmetros em todas as simulações foram os indicados pelo fornecedor do software. Para o molde foram usados os valores 2 e 5 e para as partes com maior refinamento foram usados os valores 2 e 3, para *Maximum length ratio of neighboring elements* e *Maximum aspect ratio of an element*, respectivamente.

### Number of Coarsening Loops e Coarsening Threshold

Esses dois parâmetros são necessários no caso de se utilizar uma malha composta. Eles servem para controlar o engrossamento da malha, ou seja, tornar ela menos refinada e fazer a transição de uma malha cartesiana para uma composta. Após a criação da malha cartesiana, o gerador da malha percorre por ela buscando identificar regiões em que os elementos podem ser mesclados. Geralmente a mesclagem é possível se houver  $2 \times 2 \times 2$  elementos na malha (ou seja, um total de oito elementos com dois elementos em cada direção de coordenada) que podem ser substituídos por um único elemento maior. Porém, esse procedimento só é realizado se o número de elementos ao longo da seção transversal do volume ainda for igual ou maior que o *Coarsening threshold* após a realização do engrossamento. A varredura e a mesclagem podem ser realizadas diversas vezes. O número de execuções do engrossamento é definido pelo *Number of coarsening loops*. Para ambos os parâmetros, um valor constante é aplicado para as três direções. Os valores utilizados foram os recomendados pelo fornecedor, como mostra a Tabela 7.

Tabela 7: Valores dos Parâmetros de Engrossamento

Grupo	Coarsening Threshold	Number of Coarsening Loops
Rough	3	3
Very Fine	5	0
Gate	5	0
Fine	5	0

Fonte: o autor

### Mesh Quality

Esse campo, diferentemente dos parâmetros citados até agora, é um campo com saídas do software, onde ele indica a qualidade da malha gerada. Ele é dividido em cinco valores: *blocked cells* (células bloqueadas), *edge-over-edge connected cells* (células conectadas por aresta), *thin wall elements* (elementos de parede fina), *two wall cells* (células em parede dupla) e *air contact cells* (células em contato com ar).

O parâmetro células bloqueadas indica quantas células do fundido estão desconectadas do ponto de injeção. Esse valor deve ser sempre zero. O segundo (células conectadas por aresta) indica o número de células do fundido que estão conectadas apenas por uma aresta ou

vértice a um elemento vizinho. Esse valor deve ser o menor possível, visto que a troca de informações entre os volumes se dá pelas faces. O parâmetro elementos de parede fina é referente a quantidade de células do fundido que estão conectados a ele por uma parede com um único elemento de espessura. O quarto (células em parede dupla), é semelhante ao anterior, porém os elementos estão conectados por uma parede com dois elementos de espessura. O quinto e último parâmetro (células em contato com o ar) é o número de elementos que estão em contato com o ar, fazendo com que as condições de contorno sejam diferentes. Para o caso do fundido, esse parâmetro deve ser igual a zero, ou seja, quanto menor forem os valores desses parâmetros, melhor será a malha.

Adaptado de: SIGMASOFT® Virtual Molding. Version 6.0.0.2. **SIGMASOFT® 6.0 Online Help**. Aachen, Germany: MAGMA Gießereitechnologie, 2023. Acesso em: 29 nov. 2023.

## APÊNDICE B – DADOS USADOS E OBTIDOS NO CÁLCULO DO GCI

	$\phi$ =temperatura média no postigo 2
$N_1, N_2, N_3$	13.305.745, 6.223.610, 5.180.668
$r_{21}$	1,288246
$r_{32}$	1,063046
$\phi_1$	86,36
$\phi_2$	87,59
$\phi_3$	90,47
$p$	19,6533
$\phi_{ext}^{21}$	86,35
$e_a^{21}$	0,01424
$e_{ext}^{21}$	0,000099
$GCI_{fine}^{21}$	0,0123%

Fonte: o autor

**ANEXO – FATOR DE PROPORCIONALIDADE**

<b>Material</b>	<b><math>\beta</math></b>
Aços de baixa liga	100
Aços de alta liga	80
Ligas de cobre	20

Fonte: Garcia (2008)