UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Érika Daine de Lima

Melhoria da refrigeração de moldes de injeção plástica usando simulação numérica e projeto para manufatura aditiva (MA)

São Carlos

2020

Érika Daine de Lima

Melhoria da refrigeração de moldes de injeção plástica usando simulação numérica e projeto para manufatura aditiva (MA)

Versão Original

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Processos e Gestão de Operações.

Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho.

São Carlos
2020

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

D278m

de Lima, Érika Daine
Melhoria da refrigeração de moldes de injeção plástica usando simulação numérica e projeto para manufatura aditiva (MA) / Érika Daine de Lima; orientador Reginaldo Teixeira Coelho . São Carlos, 2020.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Área de Concentração em Processos e Gestão de Operações -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2020.

1. Molde de injeção. 2. Moldagem por injeção plástica. 3. Canal conformal cooling . 4. Manufatura aditiva. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Bacharela **ÉRIKA DAINE DE LIMA.**

Título da dissertação: "Melhoria da refrigeração de moldes de injeção plástica usando simulação numérica e projeto para manufatura aditiva (MA)"

Data da defesa: 29/01/2020

Comissão Julgadora:	**Resultado:**
Prof. Titular **Reginaldo Teixeira Coelho** **(Orientador)** (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)	APROVADA
Profa. Dra. **Alessandra de Almeida Lucas** (Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)	Aprovada
Dr. **Luis Prado Junior** (Pradolux Indústria e Comércio Ltda.)	Aprovada

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção:
Prof. Dr. **Marcelo Seido Nagano**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família, por todo apoio, carinho e atenção, durante o desenvolvimento desta pesquisa. Em especial ao meu irmão, por ser meu exemplo desde sempre.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho pelo incentivo, motivação e orientação deste trabalho. Muito obrigada por acreditar em meu potencial e pela oportunidade para demonstrar meu trabalho.

Ao Dr. Luis Prado Junior, que nos anos de convivência, muito me ensinou, contribuindo para meu crescimento profissional e intelectual.

À Profa. Dra. Alessandra de Almeida Lucas, pela atenção e orientação durante o processo de qualificação deste trabalho.

À Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado para a realização desta pesquisa.

À empresa Pradolux, que abriu as portas para que eu pudesse desenvolver este trabalho, em especial a Sra. Mara, o Sr. Luis e o Sr. Marcus, muito obrigada.

“If you can dream it, you can do it. Always remember that this whole thing started with a dream and a mouse.”

(WALT DISNEY)

Resumo

DE LIMA, Érika Daine. **Melhoria da refrigeração de moldes de injeção plástica usando simulação numérica e projeto para manufatura aditiva (MA).** 2020. 87p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

A moldagem por injeção é um método tradicional usado para fabricação de produtos plásticos devido à sua alta produtividade, eficiência e manufaturabilidade. Esta pesquisa realiza um estudo, usando simulação numérica, analisando os efeitos da utilização de canais de refrigeração do tipo *conformal cooling* em moldes de injeção plástica. Também compara canais de refrigeração convencionais, fabricados por usinagem CNC. Logo, este estudo tem por objetivo o desenvolvimento de um método de refrigeração diferenciado usando a versatilidade e menores restrições da tecnologia de fabricação por manufatura aditiva (MA). O procedimento envolve redesenhar o sistema de refrigeração de um molde de injeção de um componente da indústria de autopeças (colaboradora nesta pesquisa), substituindo canais convencionais pelo conformal cooling. O molde em estudo é usado para a produção de uma carcaça de lanterna automotiva em plástico polipropileno com espessura mínima de 3 mm. Os parâmetros usados para a comparação entre os dois métodos foram o tempo total de resfriamento da peça, a temperatura da peça e a temperatura do molde. Como resultados mais expressivos, obteve-se uma redução de cerca de 10,6% em tempo de resfriamento para atingir a temperatura de extração, uma redução de cerca de 23,3% em temperatura da peça, e redução de cerca de 26,1% em temperatura no molde. Os resultados demonstram que usando a fabricação com canais do tipo *conformal cooling*, é possível obter um aumento considerável de qualidade e produtividade.

Palavras-chave: Molde de injeção. Moldagem por injeção plástica. Canal *conformal cooling*. Manufatura aditiva.

ABSTRACT

DE LIMA, Érika Daine. **Improvement of cooling system for plastic injection molds using numeric simulation and project for additive manufacturing (AM).** 2020. 87p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

Injection molding is a traditional method used for manufacturing plastic products due to its high productivity, efficiency and manufacturability. The present research studies, through the numeric simulation, the effects of using of conformal cooling channels in plastic injection molds, compared to conventional methods of manufacturing cooling channels, by CNC machining. Therefore, the present study aims to develop a differentiated cooling method by using a versatility and less constraints of the additive manufacturing (AM) technology. The procedure involves redesigning the cooling system used of a mold of an automotive part (used by a company that collaborates in the present study). The conventional channels will be replaced by conformal cooling. The selected mold is used for the production of a 3 mm thick part made of polypropylene plastic used for a taillight housing. The parameters selected for comparison were the total part cooling time, the part temperature and the mold temperature. As some of the most significant result are, a reduction of about 10.6% in cooling time to reach the extraction temperature, a reduction of about 23.3% in part temperature, and a reduction of about 26.1% in mold temperature. It is shown that conformal cooling type channels can achieve a significant increase in quality and performance.

Keywords: Injection mold. Plastic injection moulding. Conformal cooling channel. Additive manufacturing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Típico ciclo de injeção plástica 28
Figura 2 – Estrutura básica de um molde de injeção 30
Figura 3 – Sistema de refrigeração, qualidade da peça e tempo de ciclo 34
Figura 4 – Recomendações para o projeto de um sistema de canais tridimensionais para moldes 35
Figura 5 – Sistema de refrigeração convencional e *conformal cooling* 37
Figura 6 – Sistema de refrigeração que acompanha o perfil do produto 37
Figura 7 – Uma área entrelaçada com triângulos lineares e quadráticos 39
Figura 8 – Processos genéricos de MA, demonstrando as oito etapas 42
Figura 9 – Esquema do processo PBF 44
Figura 10 – Esquema do processo EBM 45
Figura 11 – Processo DED 47
Figura 12 – Interações dos processos híbridos de manufatura aditiva e subtrativa .. 48
Figura 13 – Interações dos processos híbridos de manufatura aditiva e subtrativa .. 49
Figura 14 – Molde de injeção plástica projeto CAD 51
Figura 15 – Vista explodida do produto cortesia da empresa Pradolux 52
Figura 16 – Postiço com canais de refrigeração convencionais 53
Figura 17 – Postiço em transparência com canais de refrigeração convencionais ... 54
Figura 18 – Representação da peça com os canais de refrigeração convencionais . 55
Figura 19 – Projeto de refrigeração cascata 56
Figura 20 – Detalhamento do postiço com canais de refrigeração convencionais seção A-A 57
Figura 21 – Detalhamento do postiço com canais de refrigeração convencionais seção B-B 58
Figura 22 – Vista isométrica do postiço com canais de refrigeração convencionais . 59
Figura 23 – Postiço com canais de refrigeração *conformal cooling* 60
Figura 24 – Postiço em transparência com canais de refrigeração *conformal cooling* 61
Figura 25 – Representação da peça com os canais de refrigeração *conformal cooling* 62

Figura 26 – Detalhamento do postiço com canais de refrigeração *conformal cooling seção A-A* 63
Figura 27 – Detalhamento do postiço com canais de refrigeração *conformal cooling seção B-B* 64
Figura 28 – Vista isométrica do postiço com canais de refrigeração *conformal cooling* 65
Figura 29 – Tempo de resfriamento da peça (convencional cascata) 69
Figura 30 – Tempo de resfriamento da peça (*conformal cooling*)..... 70
Figura 31 – Pontos selecionados para análise dos dados..... 71
Figura 32 – Tempo de resfriamento para os 8 pontos da peça selecionados na Figura 31 (convencional cascata versus *conformal cooling*)..... 71
Figura 33 – Temperatura para os 8 pontos selecionados na Figura 31 ao final do resfriamento da peça (convencional cascata)..... 72
Figura 34 – Temperatura para os 8 pontos selecionados na Figura 31 ao final do resfriamento da peça (*conformal cooling*)..... 73
Figura 35 – Temperatura para os 8 pontos selecionados na Figura 31 ao final do resfriamento da peça (convencional cascata versus conformal cooling)..... 74
Figura 36 – Temperatura do molde ao final do ciclo (convencional cascata) 75
Figura 37 – Temperatura do molde ao final do ciclo (*conformal cooling*)..... 76
Figura 38 – Temperatura para os 8 pontos selecionados na Figura 31 do molde ao final do ciclo (convencional cascata versus conformal cooling)..... 77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos componentes do molde.....31
Tabela 2 – Tipo de fluxo de refrigerante.....33
Tabela 3 – Vazão de fluido refrigerante e diâmetros dos canais de refrigeração.....33
Tabela 4 – Recomendações para o projeto de um sistema de refrigeração em moldes 35
Tabela 5 – Definição das dimensões do canal de refrigeração convencional.....57
Tabela 6 – Definição das dimensões do canal de refrigeração *conformal cooling*....63
Tabela 7 – Parâmetros de simulação.....66
Tabela 8 – Propriedades físicas da água.....67

LISTA DE SIGLAS

AM	*Additive Manufacturing*
CAD	*Computer Aided Design*
CAE	*Computer Aided Engineering*
CNC	*Computer Numeric Control*
DED	*Directed Energy Deposition*
EBM	*Electron Beam Melting*
FEA	*Finite Element Analysis*
MA	Manufatura Aditiva
PBF	*Powder Bed Fusion*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 23
1.1 OBJETIVO 24
2 REVISÃO DE LITERATURA 27
2.1 O PROCESSO DE INJEÇÃO PLÁSTICA 27
2.1.1 Ciclo de injeção 27
2.1.2 Molde de injeção plástica 30
2.1.3 Sistema de refrigeração de moldes de injeção 32
2.1.4 Simulação e modelagem matemática 38
2.2 MANUFATURA ADITIVA (MA) 40
2.2.1 Tecnologia MA em metal 43
2.3 PROCESSO HÍBRIDO DE USINAGEM CNC E MA 47
3 MATERIAIS E MÉTODOS 51
3.1 ESTUDO DE CASO 51
3.2 PROJETO DOS SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO 53
3.2.1 Sistema convencional 53
3.2.2 Sistema conformal cooling 59
3.3 SIMULAÇÃO DO RESFRIAMENTO 65
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 69
4.1 TEMPO DE RESFRIAMENTO DA PEÇA 69
4.2 TEMPERATURA AO FINAL DO RESFRIAMENTO DA PEÇA 72
4.3 TEMPERATURA DO MOLDE AO FINAL DO CICLO 74
5 CONCLUSÃO 79
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 81
REFERÊNCIAS 83

1 INTRODUÇÃO

A moldagem por injeção é amplamente aplicada nos mais variados setores da economia, para produzir peças plásticas de alta qualidade e custos aceitáveis, com formatos simples ou complexos e alta precisão (LI Z et al., 2018). Para que se mantenham competitivas no mercado, as indústrias empreendem esforços constantes na busca de técnicas e processos que levem à produção mais eficiente dos componentes injetados.

Segundo Silva (2009), torna-se evidente que o desenvolvimento e fabricação do molde exerce um papel fundamental no processo, uma vez que o ferramental é determinante para a qualidade do produto, para os tempos de produção e, consequentemente, no custo final. Dentro deste contexto, o desempenho térmico do molde é crucial. Para tanto, um sistema de refrigeração eficiente e adequado beneficiará o processo de injeção como um todo.

O método tradicional de se fabricar um molde de injeção é usando uma máquina de usinagem CNC (*Computer Numeric Control*). Porém, segundo Gibson et al. (2015), quando a máquina de usinagem CNC for utilizada pode haver detalhes geométricos difíceis de serem fabricados, devido a restrições de acessibilidade ou confrontos, impedindo que a ferramenta de corte alcance a superfície de usinagem desejada. Ao analisar estas limitações, modifica-se muitas vezes o projeto idealizado, por impossibilidades de execução. Por outro lado, o emprego da manufatura aditiva (MA, em inglês: *additive manufacturing – AM*) podem eliminar ou minimizar, tais restrições, quando comparados aos convencionais. Segundo Zhai et al. (2014) formas complexas, como canais de resfriamento internos, que não podem ser fabricadas por usinagem convencional, podem ser prontamente criadas empregando-se técnicas de MA.

Dessa forma, o método de fabricação tradicional de moldes de injeção plástica apresenta limitações, fazendo com que os projetistas por vezes não escolham o melhor projeto por uma impossibilidade de construí-lo. Sabe-se ainda que para a injeção plástica o resfriamento do molde é fundamental e além de interferir diretamente no aspecto do produto, impacta no tempo de ciclo e posteriormente, na manutenção do molde (MARQUES et al., 2015). Segundo Groover (2010), a tecnologia pode ser definida como a aplicação da ciência para proporcionar à

sociedade objetos que são necessários ou desejados, a custos aceitáveis. O processo de MA está atualmente sendo desenvolvido como uma típica aplicação ainda em fase laboratorial, a fim de proporcionar à sociedade produtos de maior qualidade e a custos menores.

Assim, a presente pesquisa estuda uma possibilidade de melhoria no projeto convencional do canal de refrigeração de uma peça plástica da indústria de autopeças. Propõe-se, a elaboração de um projeto de refrigeração que acompanha o perfil da peça de estudo. Este método de refrigeração é conhecido segundo nomenclatura da língua inglesa por *conformal cooling.* Não foi encontrado na literatura uma tradução para o termo e, portanto, o mesmo será mantido.

A comparação entre os dois projetos do sistema de refrigeração será realizada usando-se uma simulação computacional com recursos de CAE (*Computer Aided Engineering*). A análise por software é uma estratégia cada vez mais aceita e aplicada pelas indústrias de plásticos antes da fabricação dos moldes, podendo ser utilizada para identificar e corrigir erros ainda na fase do projeto. Desta forma, os projetistas são capazes de desenvolver novas formas de projeto e com alto índice de acerto com um número menor de tentativas (MIRANDA; NOGUERIA, 2019; GUILONG et al., 2010).

1.1 OBJETIVO

Neste trabalho objetiva-se o desenvolvimento de um sistema de refrigeração diferenciado e inovador para um molde de injeção plástica, cuja fabricação será possível por emprego da tecnologia de MA. Os resultados obtidos serão comparados por simulação numérica em relação à refrigeração construída por processo de fabricação tradicional.

Para alcançar o objetivo, serão realizadas as seguintes etapas:

> Projeto de um sistema de refrigeração adequado para um molde de injeção plástica, que possa ser construído por manufatura convencional;
>
> Projeto de um sistema de refrigeração inovador para um molde de injeção plástica, usando a versatilidade e menores restrições da tecnologia de MA;

Análise da eficiência dos dois sistemas de refrigeração por meio de simulação via software SOLIDWORKS® Plastics 2019 (SOLIDWORKS, 2020), usando como variáveis de análise: o tempo de resfriamento, a temperatura da peça e a temperatura do molde.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O PROCESSO DE INJEÇÃO PLÁSTICA

A injeção é um método de moldagem amplamente utilizado para a fabricação de produtos plásticos (ZHANG et al., 2015). O processo é aplicado na indústria de termoplásticos para produção de peças de variados formatos geométricos complexos ou não, com custo relativamente baixo e alta qualidade dimensional (AGAZZI et al., 2013; LI Z et al., 2018). A moldagem por injeção é um método muito empregado e difundido na indústria devido à sua alta produtividade, eficiência e manufaturabilidade (PARK; DANG, 2017).

Na moldagem por injeção plástica o tempo de ciclo curto é fundamental para a alta produtividade, portanto, deve ser minimizado. Além disso, é necessária alta qualidade dimensional e geométrica do produto. Deformação, contração de volume e linha de solda, são não-conformidades importantes que ocorrem no processo e devem ser evitados para garantir a precisão da dimensão e a aparência do produto (KITAYAMA et al., 2017).

Nas últimas décadas, o mercado consumidor de produtos plásticos cresceu exponencialmente, o que resultou em taxas de produção cada vez mais rápidas (ALTAF et al., 2016). Logo, tornou-se muito importante reduzir os custos de fabricação e otimizar o tempo de ciclo de produção (JAHAN; EL-MOUNAYRI, 2016).

2.1.1 Ciclo de injeção

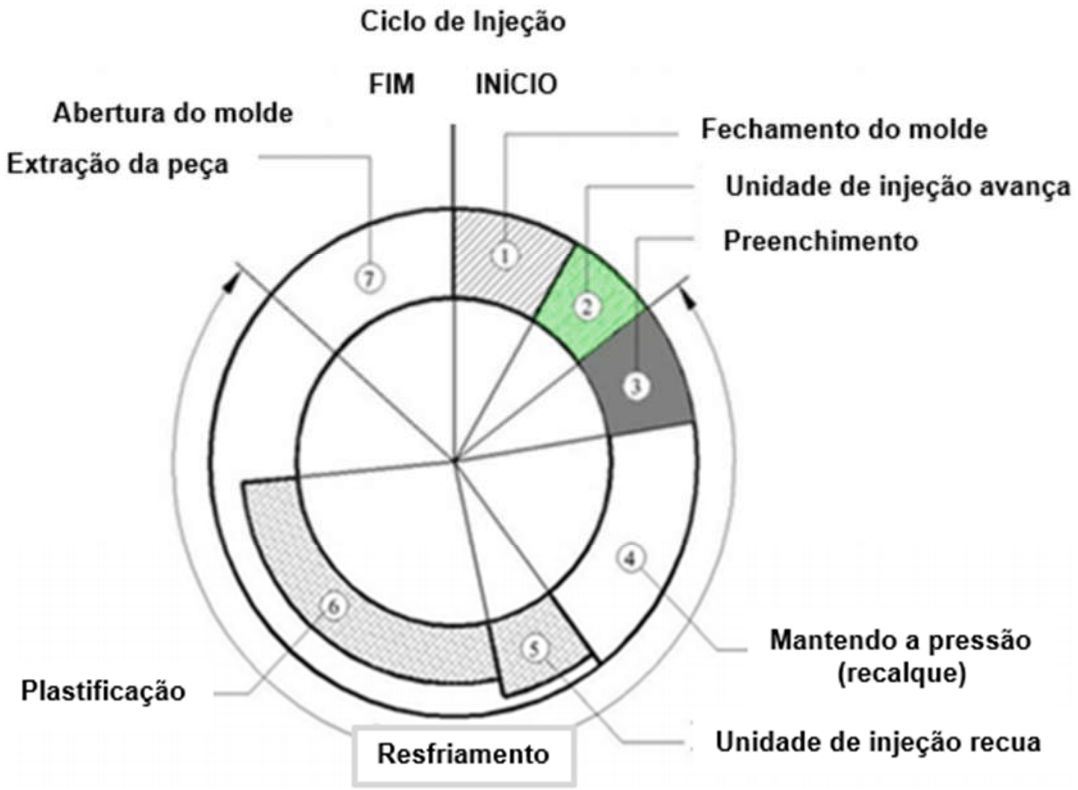
O princípio básico da moldagem por injeção é que um polímero sólido é fundido e injetado em uma cavidade dentro de um molde; que então é resfriado e a peça pronta é ejetada da máquina (DIMLA et al., 2005; KITAYAMA et al., 2017).

O tempo de ciclo de uma injeção é o tempo total necessário para moldar um produto de plástico. Em um processo de injeção plástica, o ciclo de produção consiste em três fases principais. Na primeira fase, conhecida como etapa de injeção ou enchimento, o plástico fundido é alimentado para dentro do molde. Durante a segunda fase, conhecida como recalque, a pressão é mantida no plástico fundido para compensação da contração volumétrica e o mesmo é injetado até recompor o

encolhimento. A terceira fase, ou fase de resfriamento, é a fase em que a temperatura do plástico é reduzida a uma temperatura segura para a extração. Todas estas fases estão inter-relacionadas e são afetadas por vários fatores, tais como: características da matéria-prima, condição da injetora, projeto do molde, parâmetros do processo e são determinantes na qualidade do produto final (MARTOWIBOWO; KASWADI, 2017).

No ciclo de injeção de produtos à base de polímeros, verifica-se que a fase da refrigeração é a mais longa, na grande maioria das situações, conforme Figura 1.

Figura 1 – Típico ciclo de injeção plástica



Fonte: Pötsch e Michaeli (2008).

Durante o ciclo de injeção, há uma fase em que a peça plástica deve ser resfriada à temperatura de extração para que a peça moldada possa se solidificar e sua forma mantida. O resfriamento é geralmente realizado por água que circula pelos canais de refrigeração. Estes se localizam no interior do molde, evitando que água

entre em contato direto com a peça moldada. Uma porção substancial do ciclo total de injeção é o resfriamento (AGAZZI et al., 2013; WANG, 2015; KUO et al., 2017).

De acordo com Agazzi et al. (2013, p.170) “devido à baixa difusividade térmica do polímero ($\sim 10^{-7}$ m²/s comparado com aço, por exemplo, que é de $\sim 10^{-4}$ m²/s e o ar que é de $\sim 10^{-6}$ m²/s) a transferência de calor na peça é lenta e mais de 60% do processo de ciclo de injeção tem sido dedicado ao resfriamento da peça (embalagem e solidificação).” LI Z et al. (2018), complementa que o estágio de resfriamento pode ocupar até 90% do tempo do ciclo de moldagem na produção, dependendo do formato e espessura da peça a ser injetada e do tipo de máquina injetora.

O calor contido no polímero fundido é transferido para a estrutura do molde e deve ser removido pela água nos canais de refrigeração de modo que o plástico possa assumir a forma desejada antes da extração (ALTAF et al., 2016). O tempo de resfriamento depende, entre outros fatores, de quanto tempo é necessário para que o material do molde (normalmente aço) transfira o calor da cavidade para o fluído refrigerante, normalmente água (MARTOWIBOWO; KASWADI, 2017).

Embora a configuração do sistema de refrigeração do molde seja essencial, frequentemente ela é baseada na experiência do projetista e com as limitações das tecnologias disponíveis para sua fabricação. Não é comum uma análise completa da transferência de calor entre o molde, fluído refrigerante e a peça plástica (AGAZZI et al.,2013).

Sendo assim, diversos autores afirmam que os objetivos da otimização do sistema de refrigeração do molde são basicamente: obter uma distribuição de temperatura uniforme, minimizar o tempo de resfriamento (consequentemente o tempo de ciclo total de injeção), eliminar defeitos nos produtos (garantia de melhor qualidade) e reduzir o custo de fabricação do ferramental. Portanto, projetar os canais de resfriamento é um passo muito importante no projeto do molde e uma grande oportunidade para a busca de novas tecnologias de refrigeração e fabricação (PARK; DANG, 2010; ZHANG et al., 2015; ALTAF et al., 2016; JAHAN; EL-MOUNAYRI, 2016; MARTOWIBOWO; KASWADI, 2017; KUO; XU, 2018).

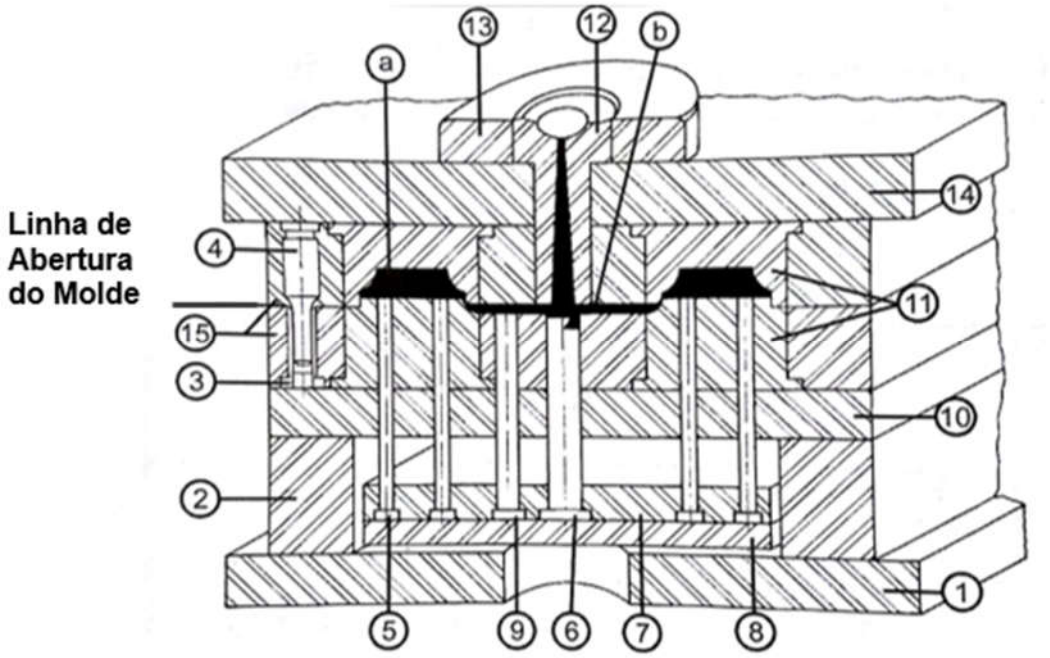
Segundo Steinko (2004), no mínimo 60% dos defeitos aparentes (distorção de formato, variações dimensionais, formação de rebarbas e defeitos superficiais), podem estar relacionados com o projeto incorreto ou ainda com a escolha do sistema

de refrigeração inadequado. Também agravado pela complexidade mecânica que se mostra ser um molde de injeção plástica.

2.1.2 Molde de injeção plástica

O molde de injeção é, em si, uma unidade completa com capacidade de produzir peças moldadas. Suas cavidades possuem as formas e as dimensões da peça desejada, levando-se em conta a contração do material plástico que será moldado. O molde é montado na máquina injetora e recebe o material plástico fundido, introduzido por meio de pressão (HARADA, 2004). O desenho esquemático básico de um molde pode ser visualizado na Figura 2 e as características de seus componentes na Tabela 1.

Figura 2 – Estrutura básica de um molde de injeção



Fonte: Harada (2004).

Legenda (continua):	
1 – Placa de fixação inferior;	9 – Pino de retorno;
2 – Coluna ou espaçador;	10 – Placa-suporte;

Legenda (conclusão):

3 – Bucha-guia;	11 – Postiços;
4 – Coluna-guia;	12 – Bucha de injeção;
5 – Pino extrator;	13 – Anel de centragem;
6 – Extrator de canal;	14 – Placa de fixação superior;
7 – Placa porta-extratores;	15 – Placa de montagem de postiços superior e inferior;
8 – Placa impulsora;	a – Cavidade; b – Canal de distribuição.

Tabela 1 – Características dos componentes do molde

Componentes do molde	Características
Base do molde (1 e 14)	Mantém a cavidade, deve estar corretamente posicionada em relação ao bico da máquina
Pinos guia (4)	Mantém o alinhamento entre as duas metades do molde
Bucha de injeção (12)	Controla a entrada do material para a parte interna do molde
Canais (6)	Controlam a passagem do material desde o bico até a cavidade
Entradas	Controlam a entrada do material na cavidade
Cavidades e macho (11)	Controlam o tamanho, a forma e a superfície da peça
Sistema de refrigeração	Controla a temperatura das superfícies do molde para solidificar o material
Gaveta, pino, lateral	Formam os furos, rasgos, rebaixos e roscas do produto final
Saídas	Permitem a saída de gás e ar
Mecanismo de extração (6, 7 e 8)	Extrai a peça rígida da cavidade
Pinos de retorno (9)	Retornam os extratores à posição inicial quando o molde se fecha para o próximo ciclo.

Fonte: Harada (2004, p.101).

2.1.3 Sistema de refrigeração de moldes de injeção

O sistema de refrigeração é uma rede de canais no interior do molde. O principal objetivo do projetista ao projetá-lo é obter a melhor e mais uniforme transferência de calor da peça para o fluído refrigerante (água) através das paredes das cavidades. A água circulando pelos canais no molde absorve o calor da peça. O calor é, assim, transferido do plástico fundido para o molde na interface da cavidade e, em seguida, do molde para o fluído refrigerante e então, o calor é removido da água em um sistema externo ao molde (LI Z. et al., 2018). Dessa forma, o sistema de refrigeração do molde deve proporcionar uma temperatura uniforme em toda a superfície da cavidade. A distribuição desigual da temperatura resulta no aumento de possíveis desvios dimensionais e visuais do produto (VOJNOVÁ, 2016).

A temperatura das cavidades não é constante durante o processo de injeção. Flutuações de temperatura devem ser tão pequenas quanto possível e, portanto, é necessário otimizar o processo de refrigeração. Isso significa que se deve escolher corretamente o tamanho e o local dos canais de distribuição do fluido no interior do molde (VOJNOVÁ, 2016).

Logo, o calor transferido para a cavidade do molde pelo material fundido precisa ser extraído. De acordo com Park e Dang (2010) o balanço térmico no molde é estabelecido quando os fluxos de calor que entram e saem do molde estão em equilíbrio. O balanço térmico no molde pode ser resumidamente descrito, pela Equação 1.

$$Q_F + Q_R + Q_A = 0 \qquad (1)$$

Onde Q_F, Q_R e Q_A, são respectivamente: o fluxo de calor proveniente do plástico fundido, o fluxo de calor trocado pelo fluído refrigerante e pelo ambiente.

O fluxo nos canais de resfriamento pode ser classificado de acordo com o número de Reynolds. O fluxo desejado é o turbulento, uma vez que esse tipo de fluxo melhora a transferência de calor do molde para o fluido promovendo a troca térmica mais eficiente (DIMLA et al., 2005). O número de Reynolds, a vazão e, o tipo de fluxo refrigerante, são descritos conforme Equação 2, Equação 3 e Tabela 2, respectivamente.

$$Q = A.U \quad (2)$$

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho U d}{\mu} \quad (3)$$

Onde Q é a vazão, A é a área da seção transversal do canal, ρ é a densidade do fluido refrigerante, d o diâmetro do canal, μ a viscosidade dinâmica do fluido e U é a velocidade média do fluído refrigerante.

Tabela 2 – Tipo de fluxo de refrigerante

Número de Reynolds (Re)	Tipo de fluxo
4000 < (Re)	Turbulento
2300 < (Re) < 4000	Transição
100 < (Re) < 2300	Laminar
(Re) < 100	Estagnado

Fonte: Dimla et al. (2005).

Para alcançar o fluxo desejado, as vazões e respectivos diâmetros recomendados para dimensionamento dos canais de refrigeração podem ser visualizados na Tabela 3.

Tabela 3 – Vazão de fluido refrigerante e diâmetros dos canais de refrigeração

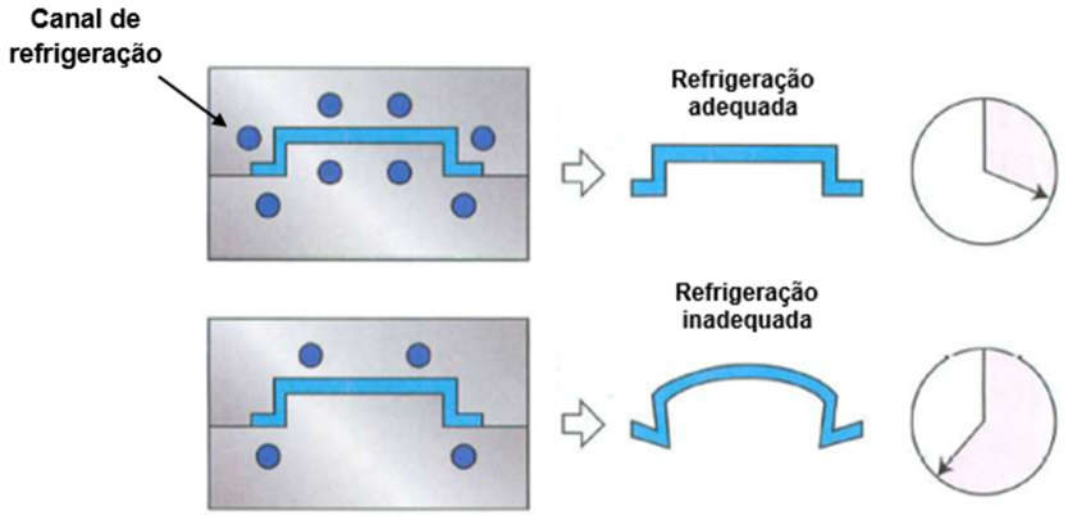
Vazão do fluido (l/min)	3,8	9,5	38	85
Diâmetro do canal (mm)	8	11	19	23,8

Fonte: Manrich (2005).

Dimla et al. afirma que (2005, p.1296) “se a peça for extraída com a mesma temperatura em todos os pontos, a retração subsequente fora do molde também é uniforme e isso evita o empenamento pós-injeção das peças.” A Figura 3 ilustra a

comparação entre dois sistemas de refrigeração, um projeto eficiente e outro não, destacando o defeito causado na peça e também a variação de tempo de ciclo.

Figura 3 – Sistema de refrigeração, qualidade da peça e tempo de ciclo



Fonte: Shoemaker (2006).

Segundo Vojnová (2016), ao escolher o sistema de refrigeração do molde é necessário seguir as seguintes regras:

- Posicionar os canais o mais próximo possível da cavidade do produto (respeitando uma distância mínima da cavidade para evitar defeitos no produto);
- Posicionar e dimensionar os canais para que o calor seja removido intensamente dos locais onde o molde está em contato com o fluxo do material fundido injetado (em áreas de entrada);
- Escolher o sentido o fluxo de resfriamento para que ele flua da área mais quente para a área mais fria;
- Os canais devem passar através do molde de forma a não entrar em contato direto com a peça, isto é, com boas juntas de vedação;
- O diâmetro dos canais não deve ser inferior a 6 mm, caso contrário, existe o risco de entupimento como o uso frequente do ferramental. O diâmetro dos canais quando pequeno exige a utilização de água tratada.

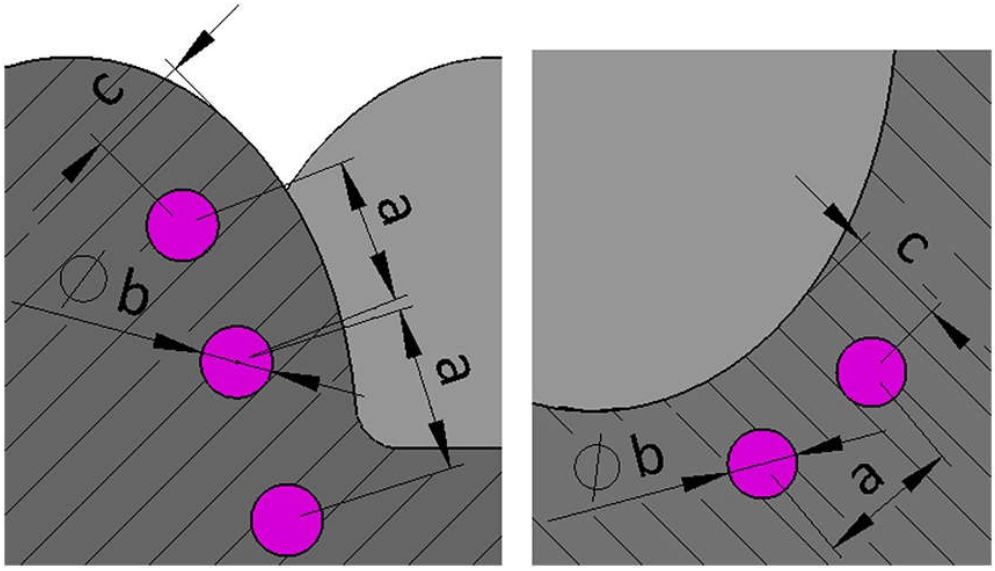
Algumas considerações básicas para o dimensionamento de um sistema de refrigeração podem ser visualizadas na Tabela 4 e Figura 4.

Tabela 4 – Recomendações para o projeto de um sistema de refrigeração em moldes

Espessura da parede do produto moldado (mm)	Diâmetro do furo: b (mm)	Distância entre os furos: a (mm)	Distância entre o centro dos furos e a cavidade: c (mm)
0-2	4-8	2-3 × b	1,5-2 × b
>2-4	> 8-12	2-3 × b	1,5-2 × b
> 4-6	> 12 a 14	2-3 × b	1,5-2 × b

Fonte: Mayer (2005).

Figura 4 – Recomendações para o projeto de um sistema de canais tridimensionais para moldes



Fonte: Marques et al. (2015).

Normalmente, o processo de furação é adotado para fazer os furos, os quais atuam como canais de refrigeração. O método usado para produzir esses furos dependem do processo de furação convencional. No entanto, esta tecnologia simples só é capaz de criar furos retos e, por isso, o principal problema é a incapacidade de

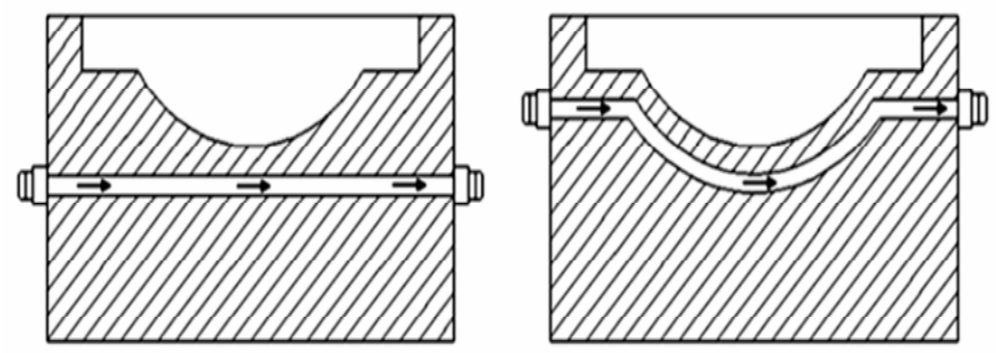
produzir canais complicados, semelhantes aos contornos das peças, especialmente próximos da parede da cavidade (DIMLA et al., 2005; ALTAF et al., 2016).

A importância do estágio de resfriamento em moldagem por injeção tem atraído a atenção de pesquisadores e projetistas de moldes. Eles têm buscado a melhoria do sistema de refrigeração no molde, entre: otimizar os canais de resfriamento convencionais (linhas de resfriamento retas) e encontrar uma nova arquitetura para os canais de resfriamento (PARK; DANG, 2017).

A técnica conhecida como *conformal cooling*: canais de resfriamento internos próximos a cavidade e que acompanham o perfil das peças a serem injetadas; foi introduzida como um método alternativo e eficiente comparado com as práticas anteriores de resfriamento para superar as questões acima mencionadas (ALTAF et al., 2016). Acredita-se que o tempo de resfriamento pode ser então encurtado pelos moldes com esta configuração de canal, ocorrendo refrigeração uniformemente em todas as zonas do molde, e consequentemente, melhorando de forma significativa a qualidade e diminuindo o ciclo de injeção das peças (LIU et al., 2018). Essa nova abordagem pode gerar canais de resfriamento com taxa de fluxo de temperatura mais alta, de modo que a eficiência da transferência de calor seja melhorada na moldagem por injeção plástica (WANG, 2015). Sendo assim, o método de resfriamento *conformal cooling* (que segue o perfil da peça) oferece possibilidades completamente novas para a refrigeração de moldes, que nunca poderiam ser alcançadas pelo método convencional de fabricação de moldes, usando tecnologia de usinagem CNC. Logo, a tecnologia de MA, permite maior liberdade geométrica na fabricação, uma vez que utiliza a fabricação por camadas, como será mais detalhado à frente (ZHAI et al., 2014; JAHAN; EL-MOUNAYRI, 2016; VOJNOVÁ, 2016).

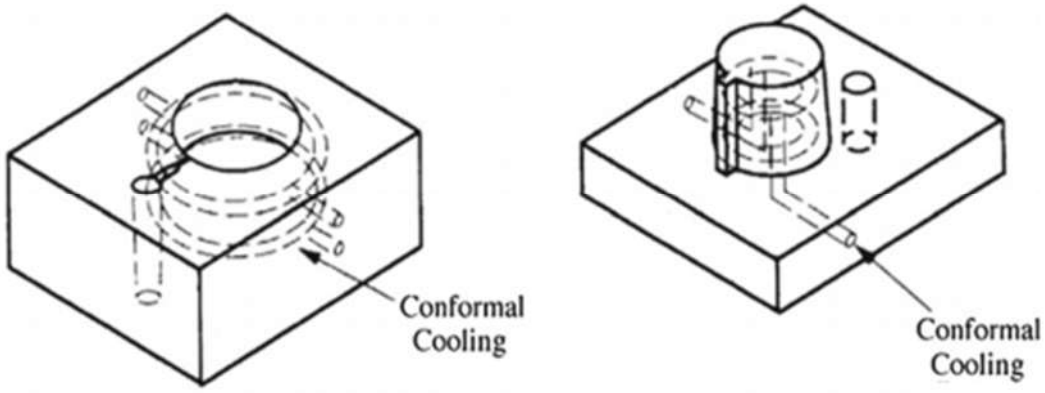
Diante das dificuldades em se produzir canais de refrigeração que acompanhem o perfil das peças (Figura 5 e 6) pelos métodos convencionais, a MA pode produzir canais acompanhando o perfil das peças (JAHAN; EL-MOUNAYRI, 2016).

Figura 5 – Sistema de refrigeração convencional e *conformal cooling*



Fonte: Altaf, Rani e Raghavan (2013).

Figura 6 – Sistema de refrigeração que acompanha o perfil do produto



Fonte: Sachs et al. (2000).

O processo de MA já demonstra ter capacidade não apenas de proporcionar liberdade no projeto de uma geometria complexa de partes do molde, mas também uma oportunidade de melhorar o tempo do ciclo de moldagem e o controle do processo, substituindo um projeto convencional de perfuração reta dos canais de resfriamento pelo projeto complexo de canais de resfriamento conformados (ILYAS, 2007).

2.1.4 Simulação e modelagem matemática

A utilização de sistemas de simulação durante o projeto de um produto moldado por injeção plástica exerce um papel indispensável na previsão do processo e da qualidade do produto. Os sistemas dPáge simulação, analíticos ou numéricos, se baseiam na solução das equações de conservação de massa, conservação de movimento e conservação de energia, respectivamente mostradas nas Equações 4, 5 e 6 (MARQUES et al., 2015; LUCAS; LOTTI; PESSAN, 2018).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\nabla . \rho v) = 0 \qquad (4)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = -\nabla . \rho + [\nabla . \eta \dot{\gamma}] - \rho [v . \nabla v] \qquad (5)$$

$$\rho . C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v . \nabla T \right) = \beta T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + v . \nabla p \right) + \eta \dot{\gamma}^2 + \nabla . (k \nabla T) \qquad (6)$$

Onde ρ é a densidade do material, v é a velocidade, t é o tempo; η é a viscosidade, $\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento, C_p é o calor específico, β é o coeficiente de dilatação, k é a condutividade térmica e T é a temperatura (MARQUES et al., 2015; LUCAS; LOTTI; PESSAN, 2018).

Para a conservação de energia, tem-se que a densidade do fluxo de calor é dado pela Lei de Fourier, descrita na Equação 7, onde k_{th} corresponde à condutividade térmica do material (MARTINEZ, 2019; LUCAS; LOTTI; PESSAN, 2018).

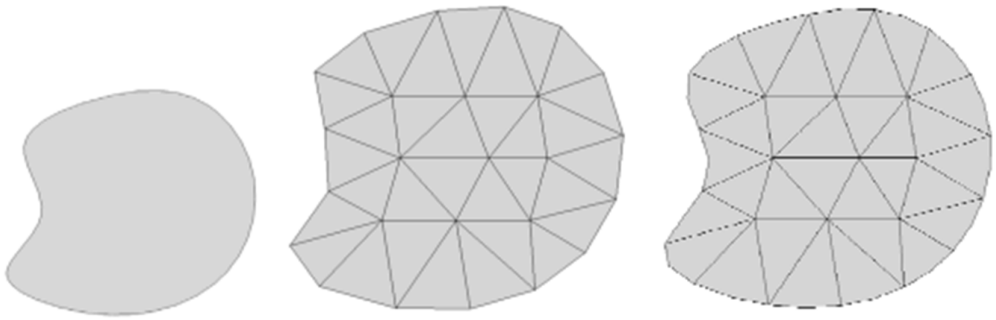
$$q = -k_{th} \nabla T \qquad (7)$$

As soluções analíticas das equações apresentadas são geralmente muito difíceis de serem obtidas devido à complexidade geométrica encontrada nos produtos moldados. As soluções então, podem ser obtidas por meio de métodos numéricos resolvidos por softwares de simulação (MARTINEZ, 2019).

Os programas de computador especializados dividem o produto moldado e, em alguns casos o molde, em pequenos domínios, tornando discreta a geometria para formar uma malha. A solução das equações que governam o processo é obtida nesses domínios de forma a transformar as equações diferencias de conservação em sistemas de equações algébricas, aplicando as condições inicias e de contorno nos nós dos domínios (LUCAS; LOTTI; PESSAN, 2018).

De acordo com Akin (2009), o conceito básico do método FEA (*Finite Element Analysis*) é substituir qualquer forma complexa pela união (ou somatório) de um grande número de formas muito simples (como triângulos, por exemplo) que são combinadas para modelar corretamente a peça original. As formas menores e simples são chamadas de elementos finitos porque cada uma ocupa um subdomínio pequeno, mas finito, da parte original. Para dar um exemplo muito simples desse processo de divisão e soma, considere a área da forma arbitrária mostrada na Figura 7.

Figura 7 – Uma área entrelaçada com triângulos



Fonte: Akin (2009).

Dessa forma pode-se dividir a área em conjunto fechado de triângulos, ou seja, cobrir a forma com uma malha. O uso de malha simplificada pode resultar na redução no tempo de simulação computacional, entretanto, dependendo do cenário simulado, pode-se reduzir também a precisão dos resultados. Por outro lado, modelos mais complexos irão exigir um considerável esforço computacional na solução dos sistemas de equações que o descrevem (AKIN, 2009).

A análise computacional utilizando software é uma estratégia cada vez mais aceita e aplicada pelas indústrias transformadoras de plásticos antes da fabricação de

moldes de injeção. A simulação do processo de injeção plástica é uma ferramenta valiosa para o projetista prever defeitos potenciais dos produtos, otimizar os parâmetros de processo, evitar problemas de injeção, além de reduzir os riscos e custos de erros na fabricação do molde (GUILONG et al.,2010; MIRANDA; NOGUEIRA, 2019).

2.2 MANUFATURA ADITIVA (MA)

O termo “prototipagem rápida” foi incialmente empregado para designar as tecnologias de se fabricar objetos físicos diretamente de fontes de dados gerados por CAD (*Computer Aided Design*) para aplicações em protótipos. Esses métodos agregam uma grande variedade de materiais, camada a camada, de forma a constituir o objeto desejado. Eles oferecem diversas vantagens em muitas aplicações, quando comparados aos processos de fabricação convencionais baseados em remoção de material (GORNI, 2001).

Incialmente estas tecnologias tinham como o objetivo principal a fabricação de protótipos de forma rápida. Contudo, à medida que a tecnologia foi amadurecendo e expandindo seu número de aplicações, passaram a serem chamadas por MA (GIBSON et al., 2015).

Peças complexas, fiéis ao seu projeto podem ser feitas em uma única etapa, sem as limitações dos métodos de processamento convencionais (por exemplo, cortes retos, furos redondos) ou formas comerciais (por exemplo, chapas, tubos). Além disso, uma redução significativa no número de peças pode ser realizada eliminando-se ou reduzindo-se, a necessidade de montar múltiplos componentes (DEBROY et al., 2018). A MA vai muito além da produção de protótipos, apresenta-se com grande potencial na área de manufatura de componentes de alto nível de complexidade geométrica (ALBERTI et al.,2014).

Os processos de fabricação de MA podem ser utilizados para gerar peças funcionais a partir de modelos virtuais 3D, proporcionando uma oportunidade de criar peças complexas, funcionalmente ajustadas ou personalizadas que podem ser utilizadas para uma variedade de aplicações de engenharia (THOMPSON et al., 2015).

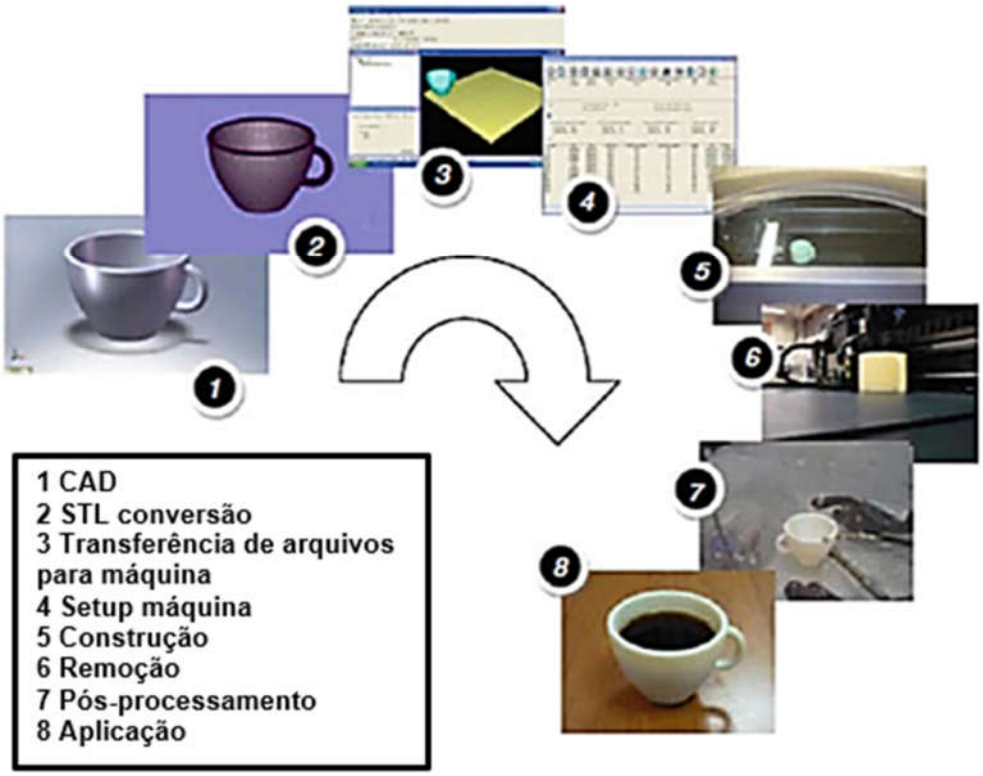
De acordo com Gibson et al. (2015), o funcionamento da MA consiste em fabricação das peças adicionando material em camadas. Todas as máquinas de MA

comercializadas até o momento usam uma abordagem baseada em camadas e, as principais diferenças estão relacionadas aos materiais que podem ser empregados, em como as camadas são criadas e como as camadas estão ligadas uma à outra. Tais diferenças determinarão fatores como a qualidade dimensional e superficial do produto final, bem como suas propriedades físico-química e mecânicas. Elas também determinarão fatores como a velocidade com que a peça pode ser feita, a quantidade de pós-processamento necessário, o tamanho da máquina de MA usada e o custo total da máquina e do processo.

De um modo geral, os equipamentos de MA operam, portanto, no conceito “camada por camada” e a diferença entre eles está no material utilizado. A construção de componente por MA requer especial atenção na deposição das camadas. A sequência correta de deposição garante o controle da geometria da peça e demais propriedades do material (ALBERTI et al.,2014).

Assim, a MA envolve uma série de passos que se deslocam da descrição do modelo em CAD para a peça física desejada. Diferentes produtos envolverão certamente MA de diferentes maneiras, mas podem ser resumidos em pelo menos oito etapas. Na Figura 8, é apresentado um esquema simplificado dessas oito etapas, indicando as fases desde a criação do modelo computacional até a sua aplicação (GIBSON et al., 2015).

Figura 8 – Processos genéricos de MA, demonstrando as oito etapas



Fonte: Gibson et al. (2015).

Uma indústria que já era conhecida por prototipagem rápida (que continua sendo uma aplicação comum e valiosa) ampliou seu alcance para uma gama mais ampla e diversificada de possibilidades, tais como padrões e moldes para fundição de metal, padrões para ferramentas, soluções para gabaritos, acessórios e ferramentas, produção direta para produtos finais, abrangendo aplicações médicas e arquitetônicas (WOHLERS, 2012). Isso oferece o potencial de reduzir o tempo e custo de produção para componentes de baixo volume e de formas complexas (THOMPSON et al., 2015). Essa tecnologia tem o potencial de transformar a indústria porque pode diminuir os custos, os riscos no projeto e contribuir para a baixa geração de resíduos e desperdícios (RAULINO, 2011).

A fabricação por adição progrediu muito além dos modelos frágeis produzidos nos primeiros anos. Os avanços na tecnologia e nos materiais empregados em MA abriram a porta para testes funcionais de projetos sofisticados e as aplicações para peças feitas por adição continuam a crescer (WOHLERS, 2012). Os fundamentos e o

princípio de funcionamento da MA oferecem várias vantagens, incluindo recursos de *design* superior e flexibilidade geométrica, ferramental reduzido, tempo mais curto para projeto e fabricação, produção local instantânea em escala global e redução de custos em materiais e energia. A MA é vista como parte de uma nova revolução industrial, entrando em um número cada vez maior de indústrias (ZHAI et al., 2014), as quais caminham para os conceitos de Indústria 4.0.

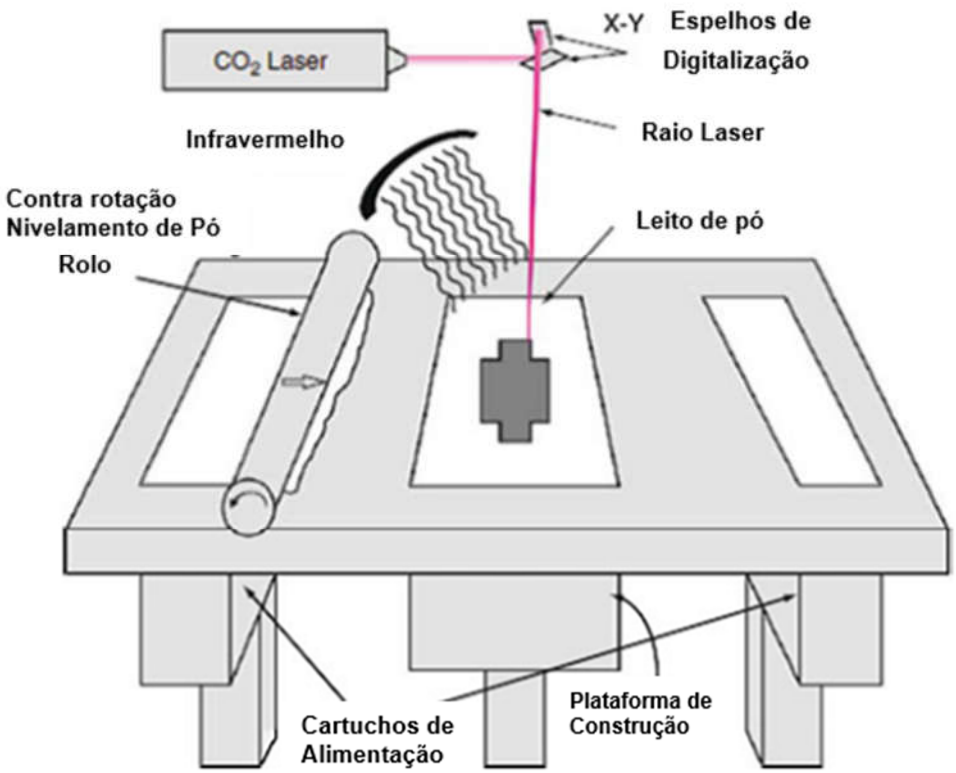
A MA tem sido amplamente aceita como um novo paradigma para o projeto e a produção de componentes de alto desempenho para aplicações nas áreas aeroespaciais, médicas, energéticas, automotivas, entre outras (DEBROY et al., 2018).

2.2.1 Tecnologia MA em metal

O campo da MA em metal ganhou força nos últimos anos, à medida que surgiram oportunidades de aplicações inovadoras para a tecnologia (TERRASSA et al., 2018), incluindo lasers industriais, hardware e software computacionais de alto desempenho e baixo custo (DEBROY et al., 2018). Há várias tecnologias disponíveis para produção de componentes metálicos por MA, tais como: PBF – *Powder Bed Fusion*, EBM – *Electron Beam Melting*, DED – *Directed Energy Deposition*, etc.

A tecnologia PBF consiste em se espalhar uma camada de pó e fundir seletivamente somente a seção transversal de interesse e, assim sucessivamente construir a peça 3D (BAHNINI et al.,2018). A Figura 9, ilustra esse processo.

Figura 9 – Esquema do processo PBF

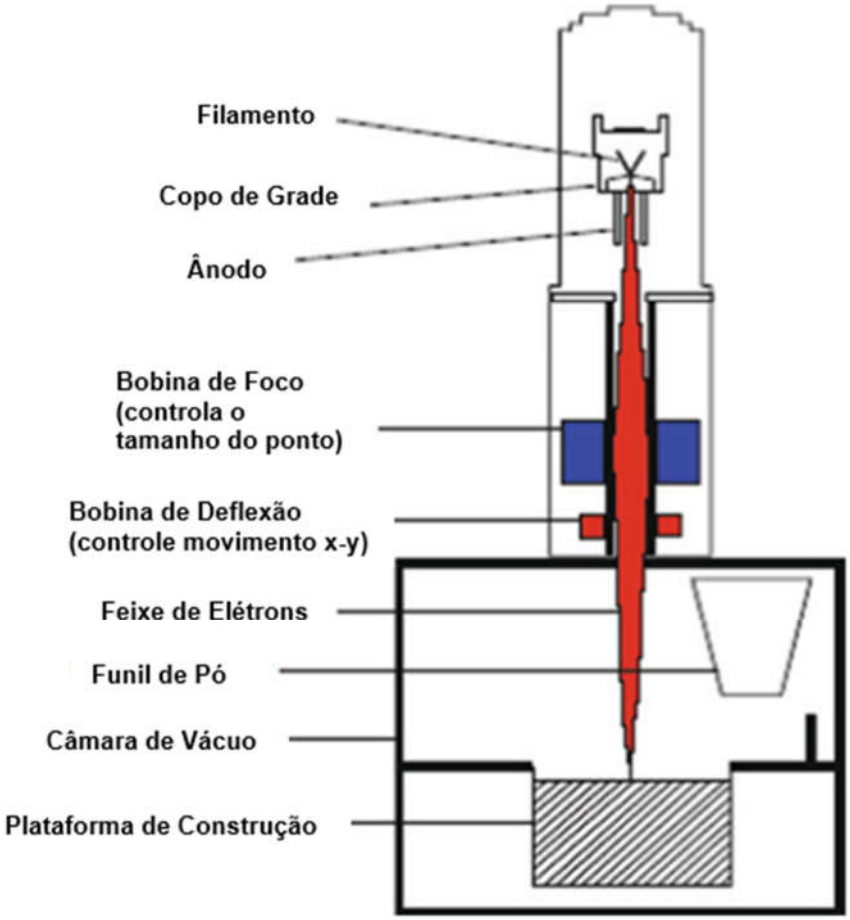


Fonte: Gibson et al. (2015).

As peças típicas construídas pelo processo PBF são complexas e estão destinadas a se tornarem ainda mais complexas, já que não há limitações geométricas no projeto para o MA. Porém, essa complexidade de forma cria um desafio para controle de defeitos, da microestrutura, da tensão residual e de deformação dentro da peça. O aquecimento altamente localizado e os ciclos térmicos repetitivos que são característicos deste processo, trazem consequentemente efeitos não desejados, o que pode afetar negativamente a qualidade geral da peça (YANG et al., 2018).

O processo EBM consiste em criar uma poça de fusão sobre um substrato usando um feixe de elétrons. A essa poça adiciona-se metal, em geral, na forma de arame em uma câmara de vácuo (GIBSON et al., 2015). A Figura 10, ilustra esse processo.

Figura 10 – Esquema do processo EBM



Fonte: Gibson et al. (2015).

O feixe de elétrons é possivelmente a fonte de calor mais flexível disponível, devido sua fácil e rápida movimentação em relação a superfície de trabalho e também em relação a distribuição de potência. Porém, o uso do feixe de elétrons tem como desvantagem a necessidade de câmara de vácuo, o que dificulta sua utilização no âmbito industrial, devido aos gastos inerentes ao controle desse processo (DOWDEN, 2008).

O processo DED é mais recente, em termos de MA para metais. De acordo com ASTM F3187-16, o processo DED é um processo MA “no qual energia térmica concentrada é usada para fundir materiais pelo derretimento quando são depositados” com uma fonte de energia, como laser ou feixe de elétrons. Dessa forma, o processo

DED cria componentes camada por camada, a partir de arquivos *.stl* (WOLFF et al., 2016). É uma avançada tecnologia que pode produzir diretamente peças totalmente densas. Neste processo, um feixe de laser é focado em um substrato metálico para criar uma poça de fusão. Movendo o substrato conforme uma rota desejada e empilhando camadas, um objeto 3D pode ser formado (LI et al., 2018).

À medida que o feixe de laser é movido para frente junto com o jato de pó metálico, uma trilha de solda é depositada, formando camadas sucessivas (THOMPSON et al., 2015; WIRTH et al., 2018).

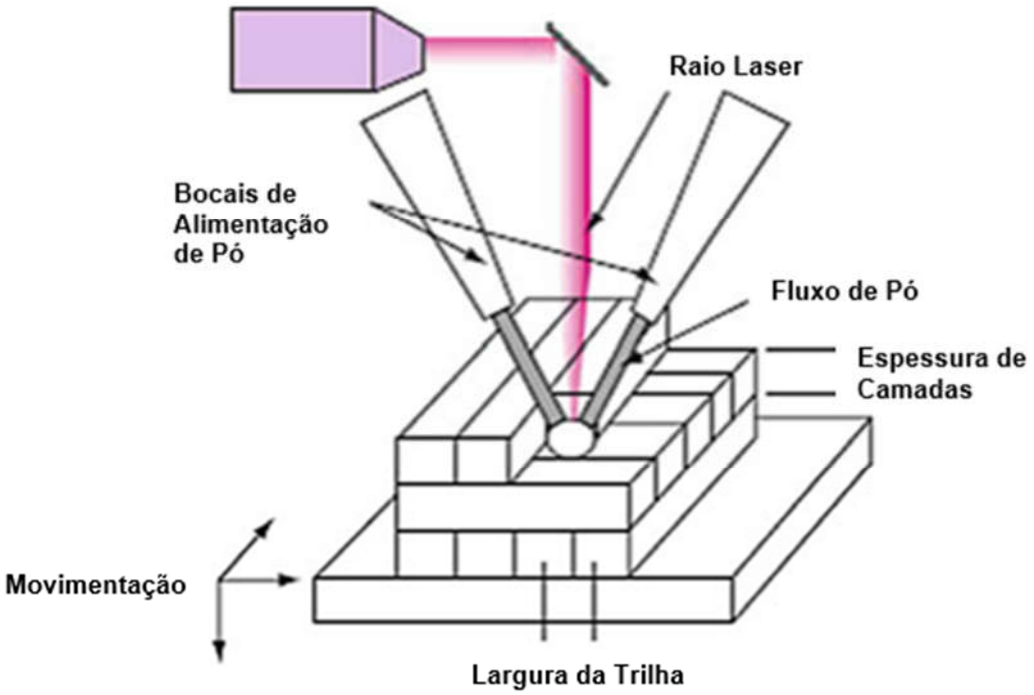
A relação entre o processo de deposição, estrutura e propriedades dos materiais, a combinação de potência do laser, velocidade de varredura, fluxo do pó e tamanho da poça fundida, resultam em um problema de controle das propriedades do material, em decorrência dos altos gradientes térmicos durante o processo (WOLFF et al., 2016).

Existe um conhecimento muito limitado sobre a condição de pó residual nos sistemas DED e, portanto, os efeitos na qualidade da construção são igualmente desconhecidos. Dada a grande porcentagem de pó que pode ser deixada após uma deposição, a reutilização do pó é atraente de uma perspectiva econômica e ambiental (TERRASSA et al., 2018).

Em resumo, os processos de DED permitem a criação de peças por fusão do material à medida em que ele é depositado por meio de uma fonte de calor concentrada (normalmente um feixe de laser ou de elétron) para fundir o material de alimentação e criar dessa forma, os objetos tridimensionais. A cada passagem do cabeçote cria-se uma trilha de material solidificado e as linhas adjacentes de material formam as camadas (GIBSON et al., 2015).

Na Figura 11, há uma representação esquemática de um processo DED usando alimentação de material em pó e laser.

Figura 11 – Processo DED



Fonte: Gibson et al. (2015).

Mesmo com o avanço da utilização de processos de MA, as propriedades mecânicas, a qualidade dimensional e de acabamento superficial muitas vezes não são adequados e os componentes fabricados ainda podem necessitar de um pós-processamento (MAZUR et al., 2017). Logo, a associação das tecnologias de usinagem CNC e MA em um único equipamento tem resultado nos processos híbridos de usinagem.

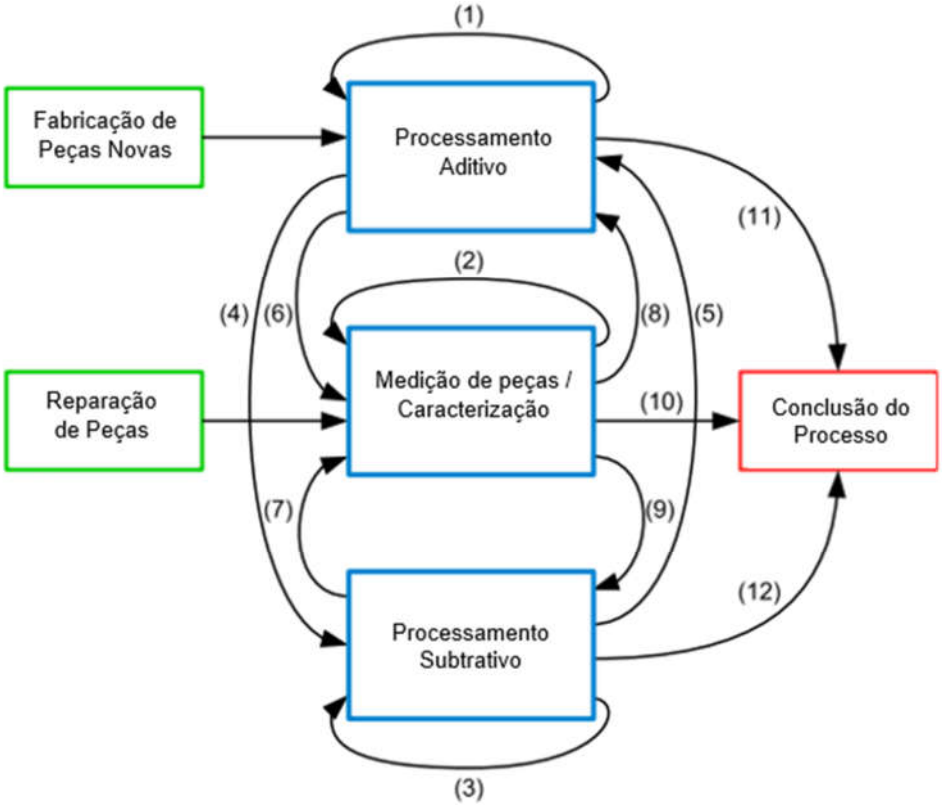
2.3 PROCESSO HÍBRIDO DE USINAGEM CNC E MA

A fabricação híbrida, que combina diferentes processos/máquinas, está chamando significativamente a atenção da indústria e da academia devido à capacidade de agrupar as vantagens consolidadas de processos independentes, ao mesmo tempo em que minimiza as desvantagens (KARUNAKARAN et al., 2009). A associação entre máquinas de tecnologia de usinagem CNC e MA pode ser considerada benéfica, pois força os fabricantes e pesquisadores a desafiar os limites de seus processos (NEWMAN, 2015).

Os pontos fortes e limitações do uso de usinagem CNC associada à MA para ferramentas devem ser cuidadosamente considerados. Entre elas estão as características geométricas, a complexidade, os materiais, o acabamento superficial e fatores como alterações de projeto, tempo de execução e risco (WOHLERS, 2012).

O número de equipamentos de trabalho de plataforma única para processos aditivos e subtrativos (máquinas híbridas) está crescendo. Muitos deles integram o processo de manufatura aditiva DED com a usinagem subtrativa por CNC. Combinar processos aditivos e subtrativos em uma única estação de trabalho, faz com que as vantagens de cada processo possam ser potencializadas. Isso facilita a fabricação com maior precisão geométrica e características de superfície desejáveis. Essas técnicas apresentam oportunidades significativas para melhorar a utilização do material, os reparos de alto valor agregado, a complexidade e a qualidade das peças (FLYNN et al.,2016). Em geral, a Figura 12 descreve as interações dos processos híbridos de manufatura aditiva e subtrativa, mostrando as operações de malha aberta e fechada.

Figura 12 – Interações dos processos híbridos de manufatura aditiva e subtrativa



Fonte: Flynn et al. (2016).

O uso de componentes metálicos fabricados por MA em aplicações específicas, críticas e de baixas tolerâncias é limitado pelos problemas de qualidade predominantes, tais como: precisão alcançável, uniformidade das propriedades dos materiais e características da superfície. Até que haja uma mudança no material de construção ou na energia utilizada, não será possível melhorar as tolerâncias das peças sem um aumento significativo de custo de construção. Isso significa que, atualmente não é possível obter a precisão dimensional necessária em um grande número de aplicações usando-se somente MA (FLYNN et al.,2016). Recursos complexos, são mostrados na Figura 13, incluindo um duto helicoidal triangular (à esquerda) e um toro oco (à direita), são fabricados por equipamento híbrido: processo aditivo e subtrativo.

Figura 13 – Interações dos processos híbridos de manufatura aditiva e subtrativa

Fonte: Simhambhatla e Karunakaran (2015).

Os materiais representam grande limitação para o desenvolvimento da MA. Há uma demanda por materiais em pó com melhores qualidades, de menores custos e também a necessidade de melhor entendimento de como os materiais se solidificam e se fundem durante o processo de deposição camada por camada. Compreender as propriedades do material é crucial para o desenvolvimento de materiais e processos ideais para tecnologias de fabricação aditiva bem como, suas aplicações (WOLFF et al., 2016). Como tal, as peças de metal fabricadas por meio de MA quase sempre requerem pós-processamento para melhorar as características de qualidade, precisão geométrica e para aliviar as tensões residuais (FLYNN et al.,2016). Essa combinação entre processos aditivos e subtrativos se mostra ideal para a produção de peças para a fabricação de moldes de injeção de plásticos.

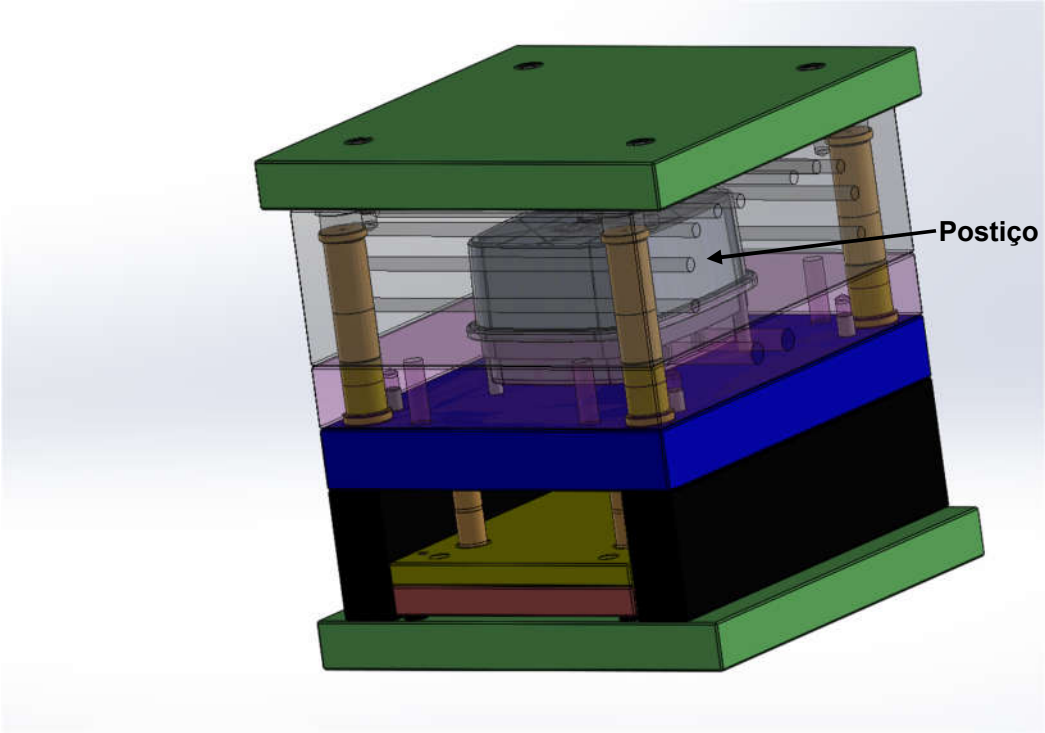
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ESTUDO DE CASO

O presente trabalho de pesquisa apresenta o projeto e análise comparativa de canais de resfriamento em um molde de injeção de plásticos. Um projeto seguirá o modelo tradicional e o outro projeto por *conformal cooling*. Ambos serão analisados quanto ao comportamento térmico durante o processo de injeção usando o SOLIDWORKS® Plastics 2019. Será utilizado um modelo CAD de um molde de injeção de um componente da indústria de autopeças. O projeto usando *conformal cooling* envolve redesenhar o sistema de refrigeração substituindo canais convencionais em um produto de linha da empresa Pradolux, colaboradora na presente pesquisa.

O molde, objeto do estudo, é usado para a produção de uma carcaça de lanterna automotiva em plástico polipropileno. O molde de injeção completo obtido por programa CAD SOLIDWORKS® 2019, é mostrado na Figura 14.

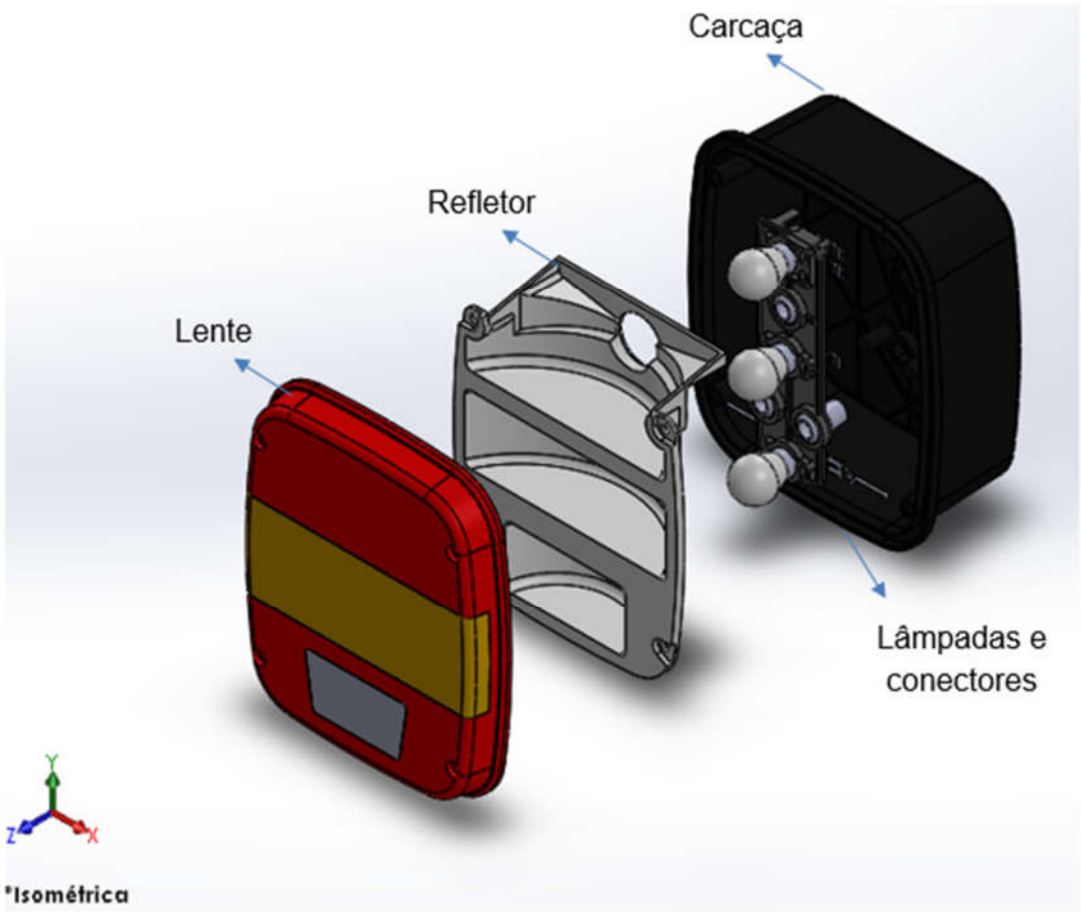
Figura 14 – Molde de injeção plástica projeto CAD



Fonte: Próprio autor. Cortesia da empresa Pradolux.

A carcaça da lanterna automotiva possui 3 mm de espessura e pode ser visualizada na Figura 15, que apresenta em vista explodida todas as partes que compõe a lanterna fabricada pela indústria colaboradora.

Figura 15 – Vista explodida do produto cortesia da empresa Pradolux



Fonte: Próprio autor.

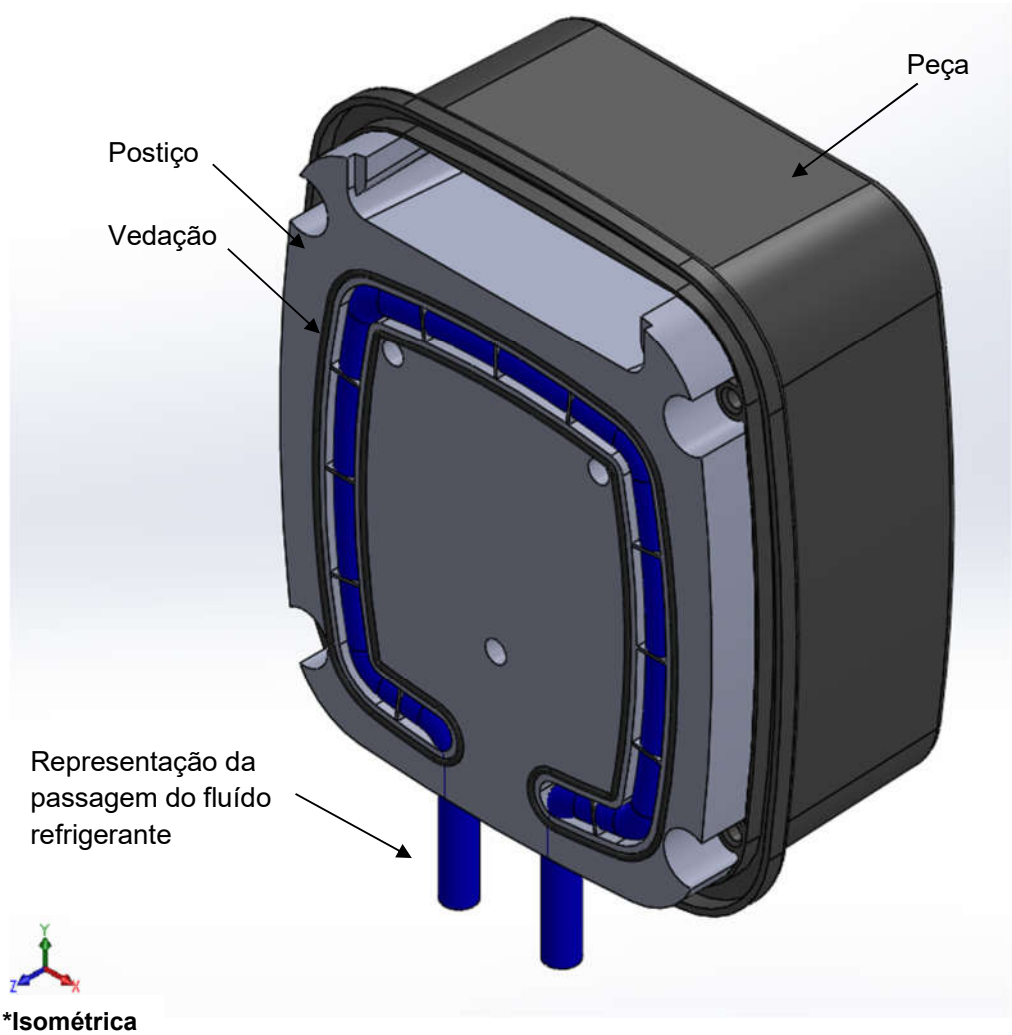
O sistema de refrigeração *conformal cooling* será inserido dentro do postiço, que é o macho da cavidade da peça. Dessa forma, não seria necessário a produção total do molde por meio da MA, apenas o postiço. O sistema de refrigeração na fêmea (Figura 14) não será alterado.

3.2 PROJETO DOS SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

3.2.1 Sistema convencional

O resfriamento por meio de furos retos é o mais utilizado pelos projetistas por ser mais conveniente e econômico (HARADA, 2004). O postiço, com canais de refrigeração tipo cascata, que foi selecionado para estudo de validação experimental e a distribuição do canal ao longo da peça, podem ser visualizados nas Figuras 16, 17 e 18.

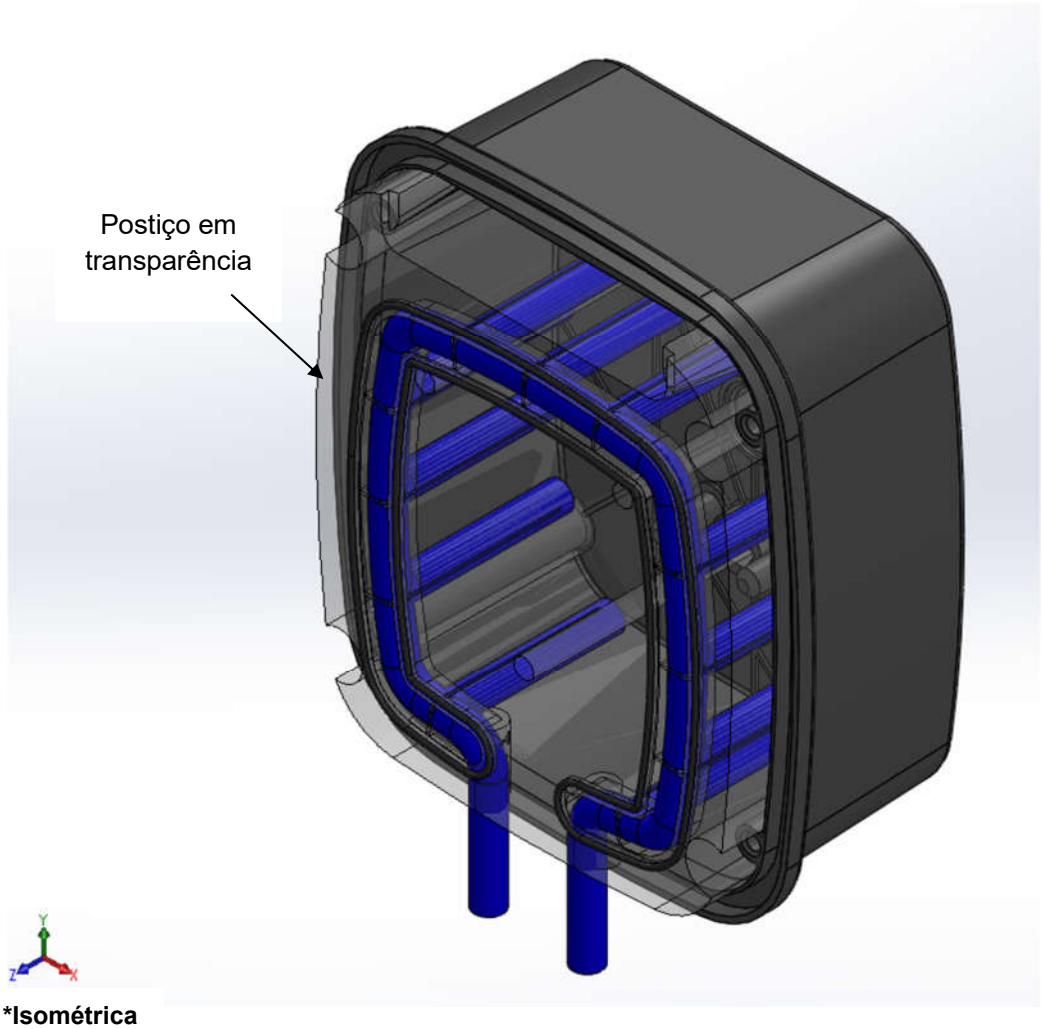
Figura 16 – Postiço com canais de refrigeração convencionais (vista isométrica)



***Isométrica**

Fonte: Próprio autor. Cortesia da empresa Pradolux.

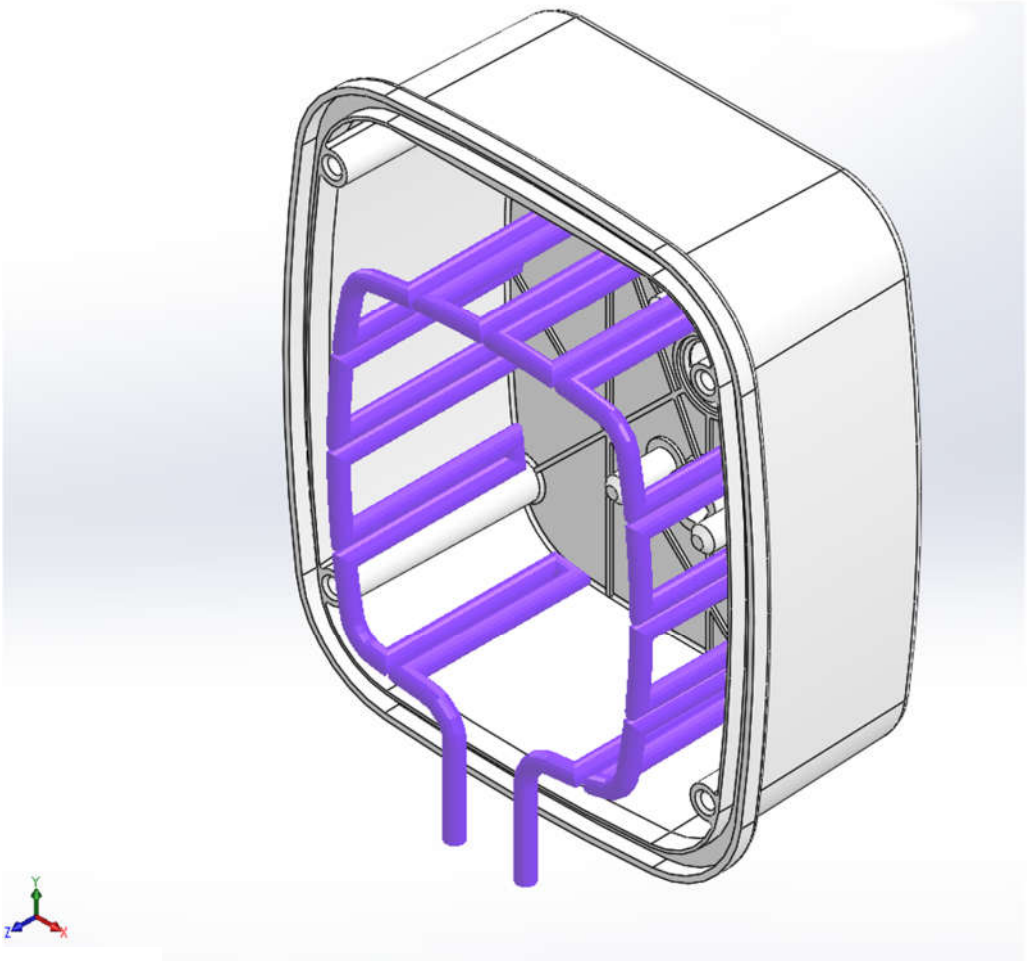
Figura 17 – Postiço em transparência com canais de refrigeração convencionais (vista isométrica)



***Isométrica**

Fonte: Próprio autor. Cortesia da empresa Pradolux.

Figura 18 – Representação da peça com os canais de refrigeração convencionais (vista isométrica)



***Isométrica**

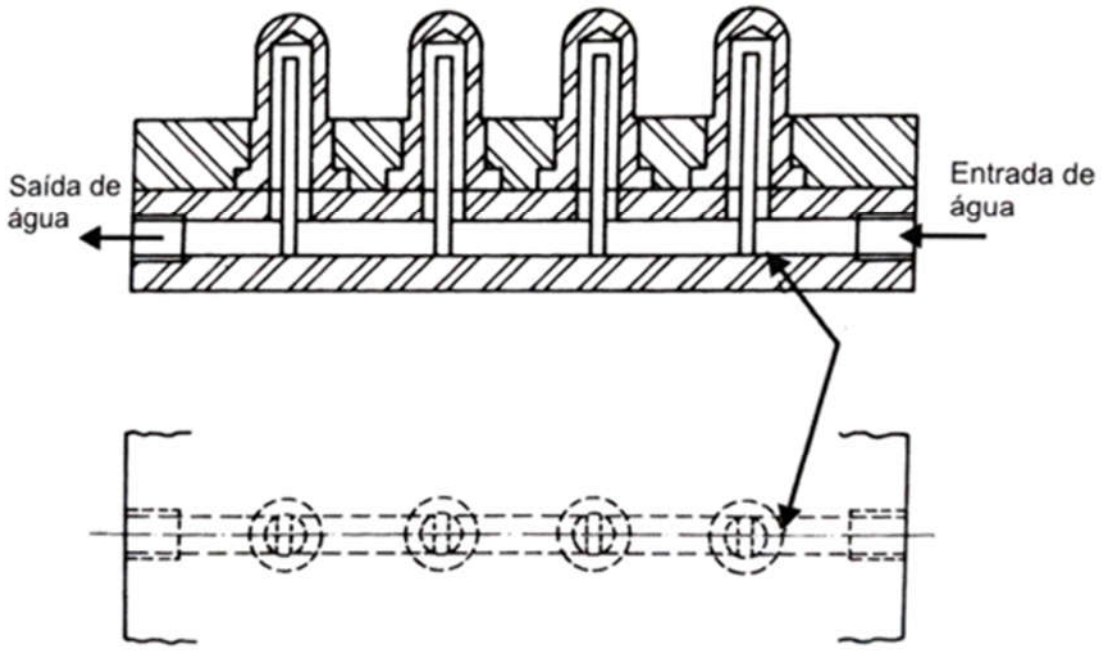
Fonte: Próprio autor. Cortesia da empresa Pradolux.

Este sistema de canal permite que sejam alcançados pontos mais profundos no postiço, com baixo custo de fabricação. Os canais convencionais (retos) foram distribuídos ao longo do postiço visando a uniformidade da temperatura na peça. Espera-se que a parte mais quente seja o centro do postiço. Porém, é o local onde há menor quantidade de plástico e devido a geometria da peça, há menor probabilidade de empenamento da mesma. Dessa forma, a refrigeração concentra-se nas paredes laterais do postiço.

Este projeto de refrigeração traz complicações inerentes as limitações da tecnologia usada, como por exemplo, a necessidade de vedação total do fluído

refrigerante, conforme mostrado na Figura 16 (no caso, a água). O que impacta diretamente na fabricação e manutenção do molde ao longo de sua vida útil. A vedação necessitará de trocas regulares, para impedir o vazamento de água. Outro ponto em destaque, visto que este tipo de canal necessita de um inserto/chapa (conforme mostrado na Figura 19) que force a passagem de água pelos canais, refere-se à possibilidade de entupimento dos canais e deslocamento da chapa, diminuindo a área de passagem do fluído ou mudando o caminho de passagem da água, o que é prejudicial a refrigeração.

Figura 19 – Projeto de refrigeração cascata



Fonte: Harada (2004).

O postiço selecionado para este trabalho possui as seguintes dimensões externas: 104,2 mm x 147,7 mm x 82,6 mm. O canal de refrigeração é de 10 mm de diâmetro, com uma área total de transferência de calor de aproximadamente 3,2 x 10^4 mm². Considerando que o produto moldado (peça de trabalho) possui 3 mm de espessura, as dimensões dos canais de resfriamento foram definidas conforme referência da Tabela 4 e Figura 4, e são mostrados na Tabela 5.

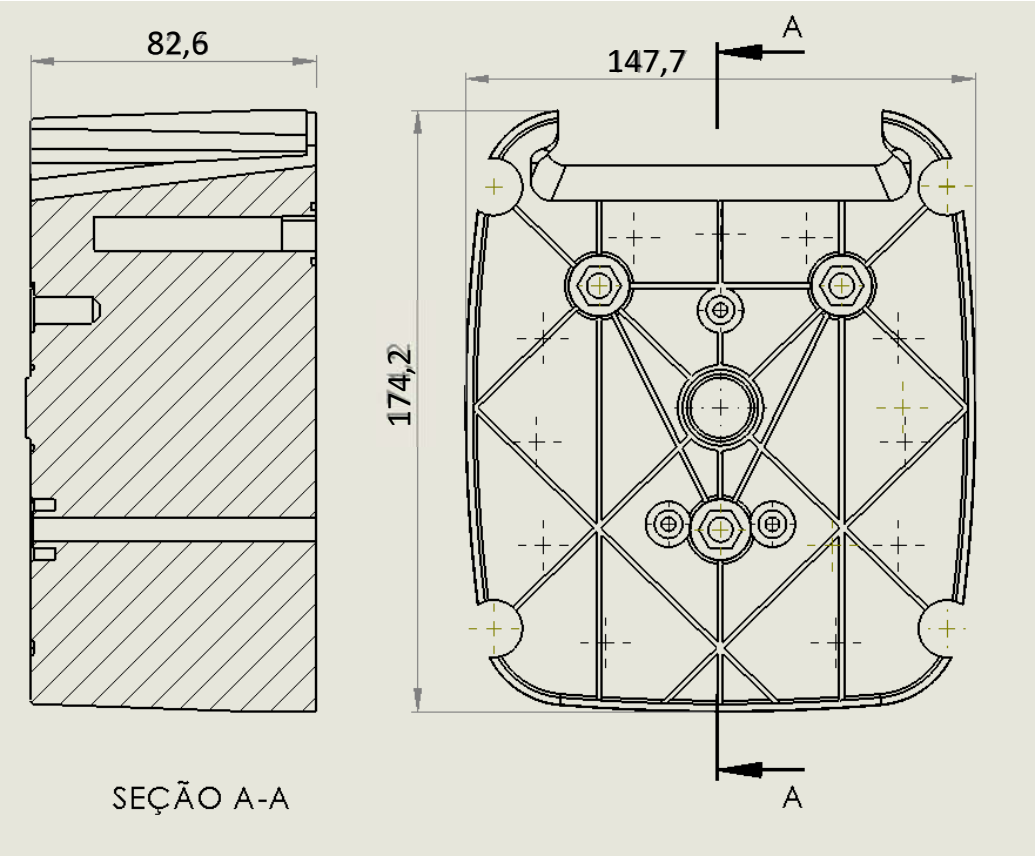
Tabela 5 – Definição das dimensões do canal de refrigeração convencional

Dimensões projeto convencional
Diâmetro do canal **b** = 10 mm
Distância entre centros dos canais $\boldsymbol{a_1}$ = 2,5 × 10 = 25 mm $\boldsymbol{a_2}$ = 3 × 10 = 30 mm
Distância entre o centro dos furos e a cavidade **c** = 1,8 × 10 = 18 mm

Fonte: Próprio autor.

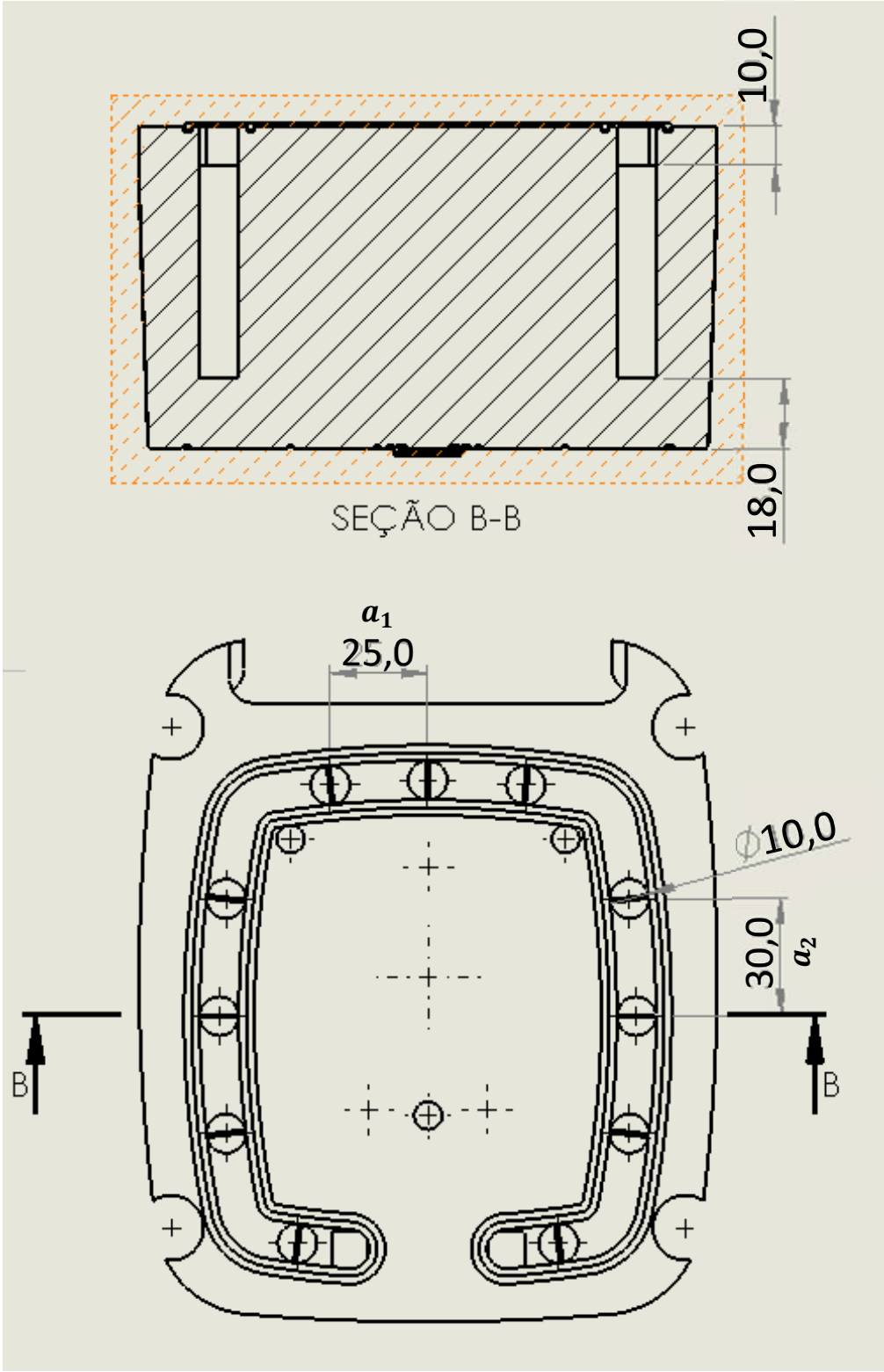
O detalhamento do sistema de refrigeração convencional é mostrado nas Figuras 20, 21 e 22.

Figura 20 – Detalhamento do postiço com canais de refrigeração convencionais seção A-A (medidas em milímetros)



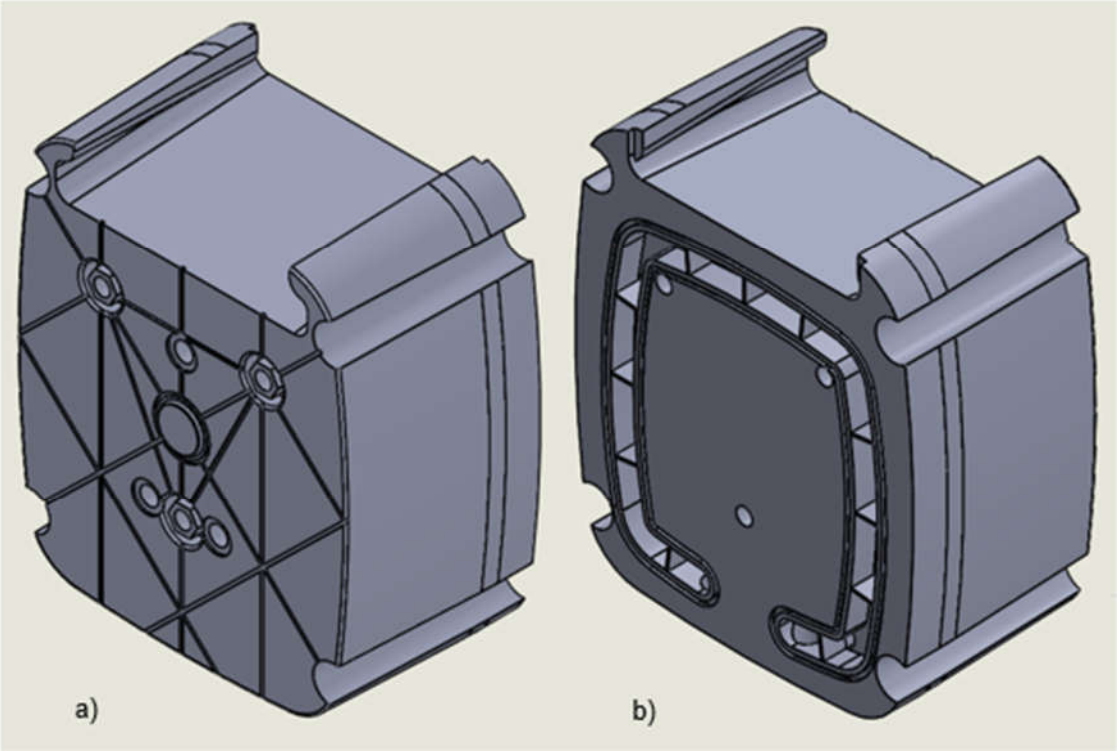
Fonte: Próprio autor. Cortesia da empresa Pradolux.

Figura 21 – Detalhamento do postiço com canais de refrigeração convencionais seção B-B (medidas em milímetros)



Fonte: Próprio autor. Cortesia da empresa Pradolux.

Figura 22 – Vista isométrica do postiço com canais de refrigeração convencionais a) frontal (à esquerda) e b) traseira (à direita)

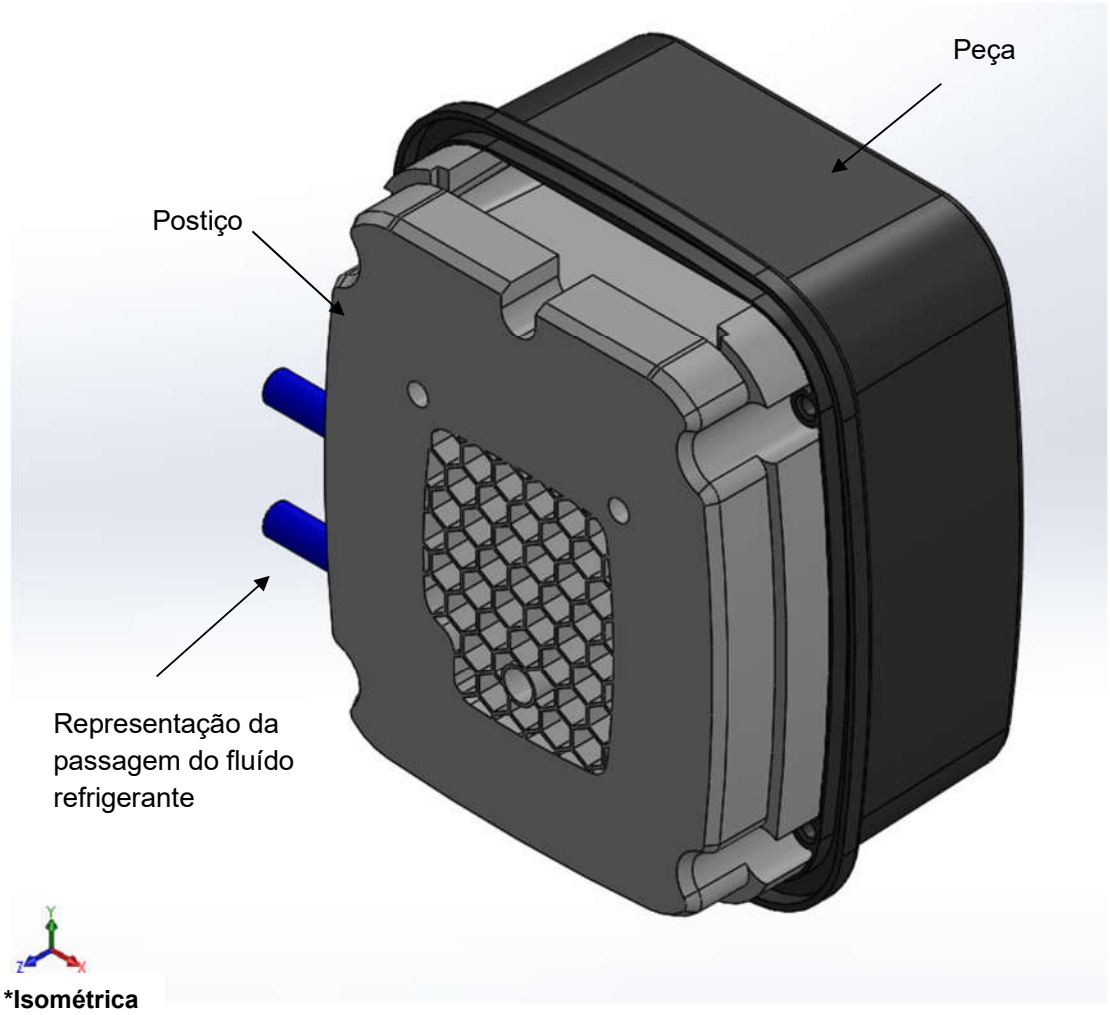


Fonte: Próprio autor. Cortesia da empresa Pradolux.

3.2.2 Sistema conformal cooling

Para melhoria do sistema de refrigeração foi desenvolvido o projeto utilizando a ideia de um canal helicoidal dentro do postiço, o formato do canal segue o perfil quadrado da peça. A ideia final do canal *conformal cooling* projetado, pode ser visualizado nas Figuras 23, 24 e 25.

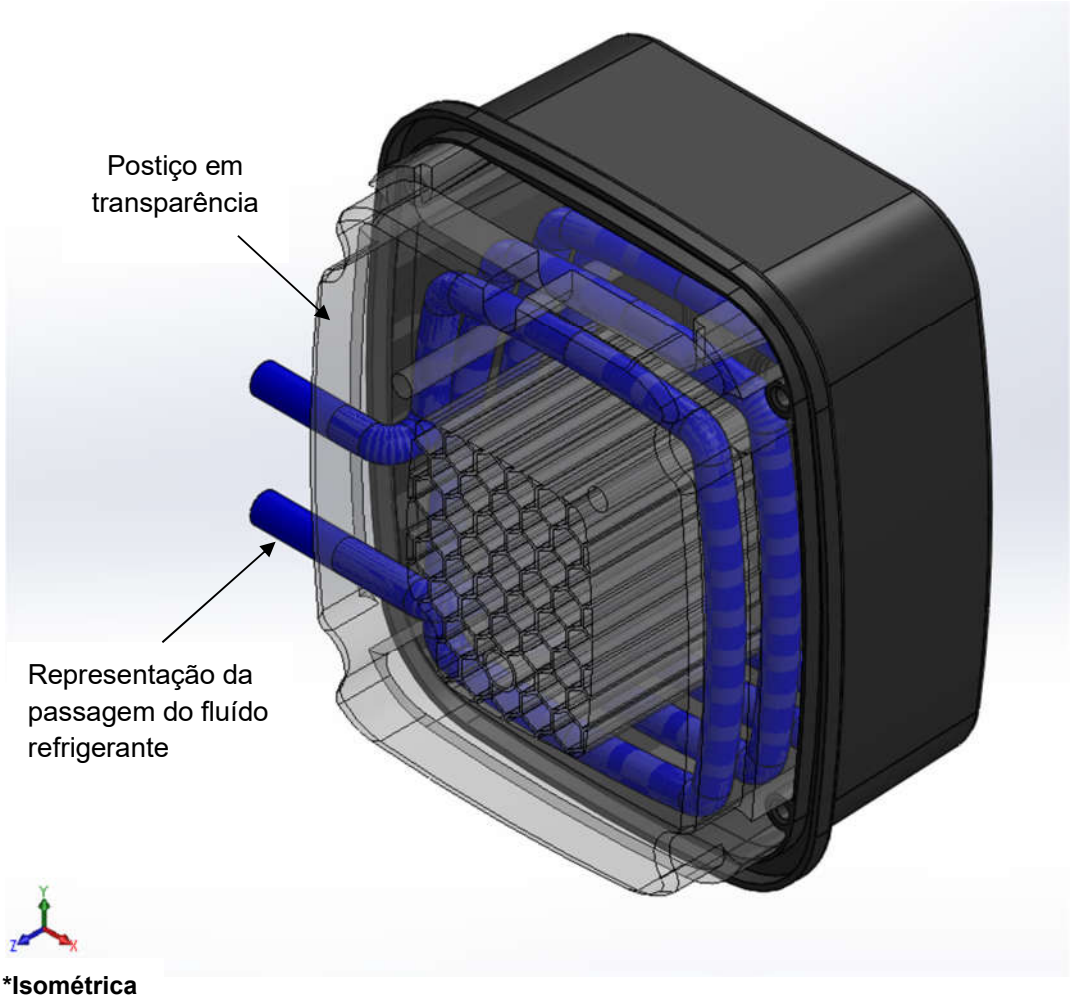
Figura 23 – Postiço com canais de refrigeração *conformal cooling*
(vista isométrica)



***Isométrica**

Fonte: Próprio autor. Cortesia da empresa Pradolux.

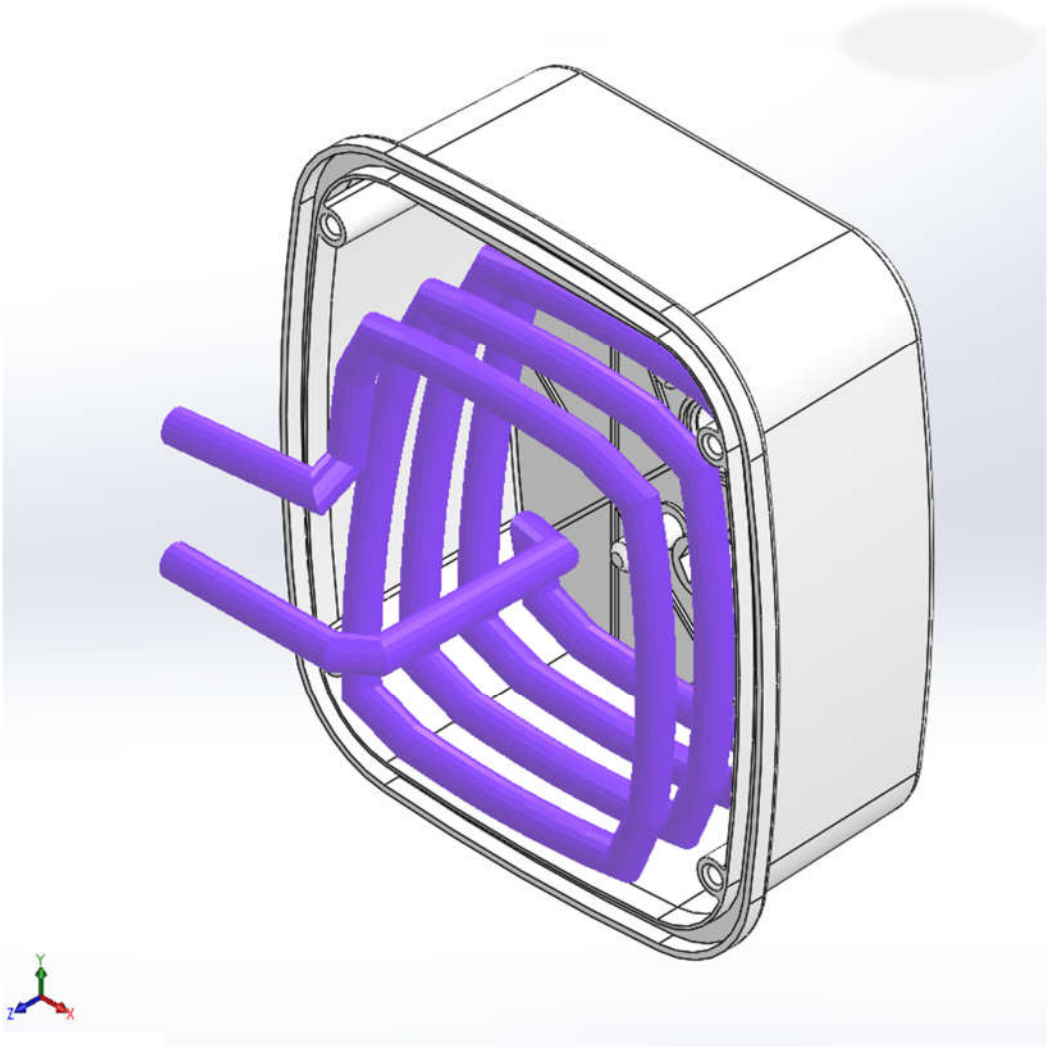
Figura 24 – Postiço em transparência com canais de refrigeração *conformal cooling* (vista isométrica)



***Isométrica**

Fonte: Próprio autor. Cortesia da empresa Pradolux.

Figura 25 – Representação da peça com os canais de refrigeração *conformal cooling* (vista isométrica)



***Isométrica**

Fonte: Próprio autor. Cortesia da empresa Pradolux.

Neste novo projeto, o postiço possui as seguintes dimensões externas: 104,2 mm x 147,7 mm x 174,2 mm. O canal de refrigeração também é de 10 mm de diâmetro, com uma área total de transferência de calor de aproximadamente 5,6 x 10^4 mm². Esta nova configuração de canal possibilitou o aumento da área e espera-se consequentemente melhorar a eficiência do sistema de refrigeração. Também, nesse novo projeto de canal de refrigeração, as dimensões dos canais de resfriamento foram definidas conforme referência da Tabela 4 e Figura 4 e são mostrados na Tabela 6.

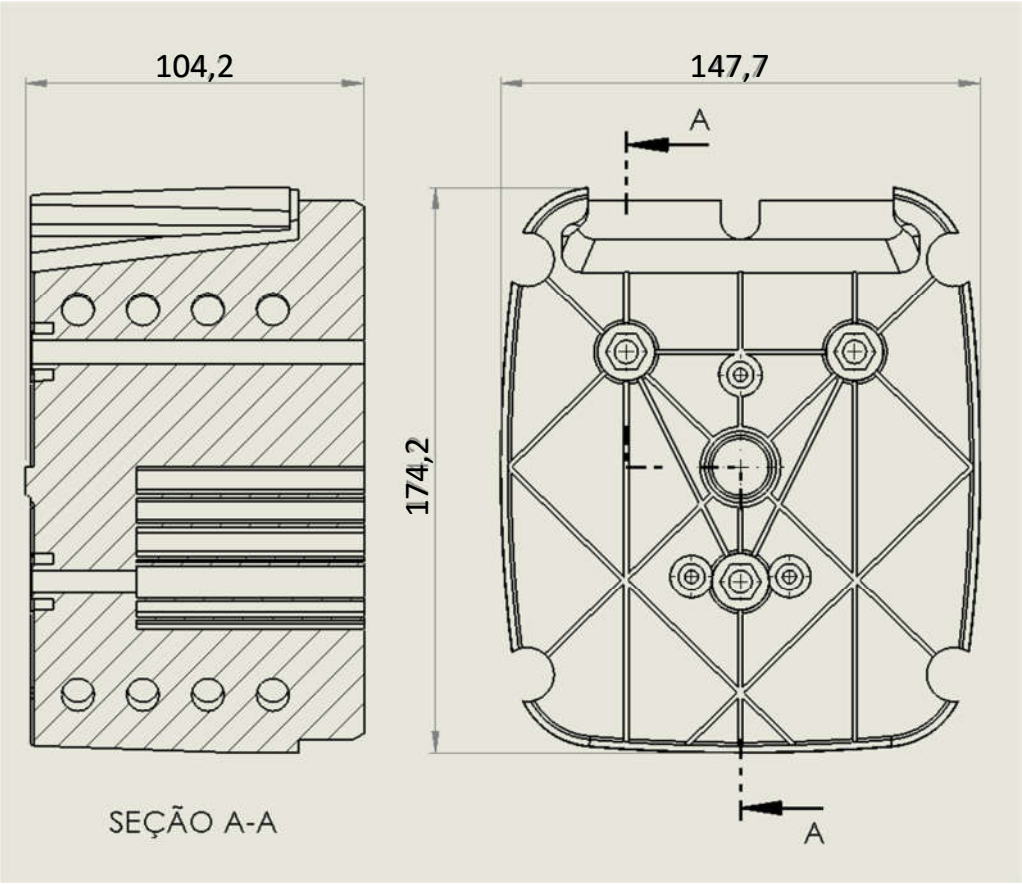
Tabela 6 – Definição das dimensões do canal de refrigeração *conformal cooling*

Dimensões projeto *conformal cooling*
Diâmetro do canal **b** = 10 mm
Distância entre centros dos canais **a** = 2 × 10 = 20 mm
Distância entre o centro dos furos e a cavidade **c** = 1,5 × 10 = 15 mm

Fonte: Próprio autor.

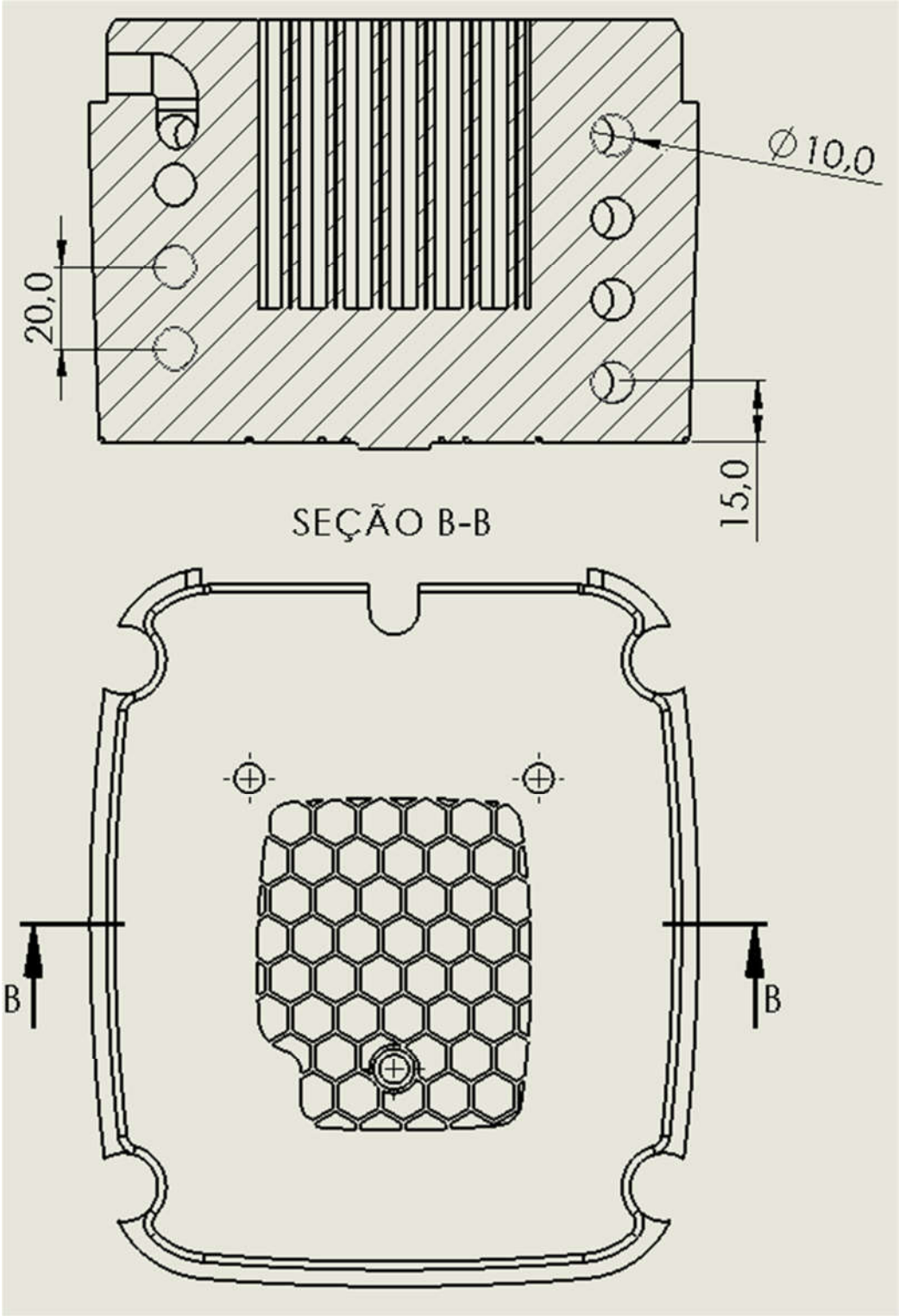
O detalhamento do sistema de refrigeração tradicional e do postiço para fabricação por meio de MA, podem ser visualizados Figuras 26, 27 e 28.

Figura 26 – Detalhamento do postiço com canais de refrigeração *conformal cooling* seção A-A (medidas em milímetros)



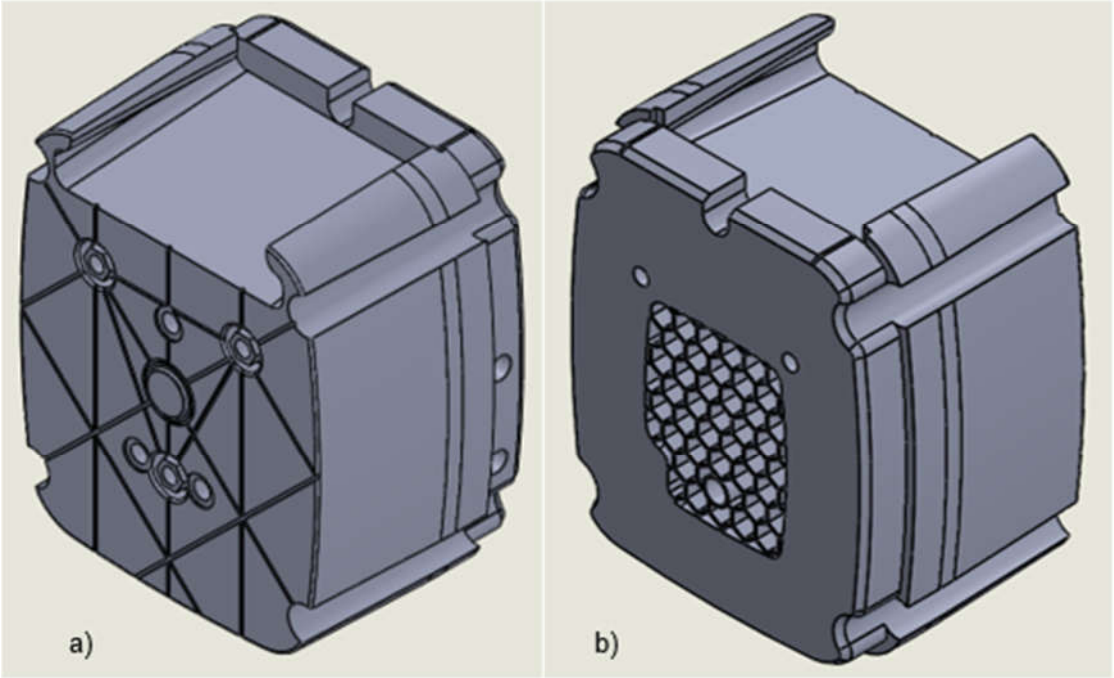
Fonte: Próprio autor. Cortesia da empresa Pradolux.

Figura 27 – Detalhamento do postiço com canais de refrigeração *conformal cooling* seção B-B (medidas em milímetros)



Fonte: Próprio autor. Cortesia da empresa Pradolux.

Figura 28 – Vista isométrica do postiço com canais de refrigeração *conformal cooling* a) frontal (à esquerda) e b) traseira (à direita)



Fonte: Próprio autor. Cortesia da empresa Pradolux.

Observa-se que este é um projeto inovador. Os canais projetados, que acompanham o perfil do produto, não poderiam ser construídos por manufatura convencional. Neste projeto não é necessário que seja feita a vedação do fluído refrigerante, pois o mesmo não tem possibilidade de vazamento, uma vez que não está em contato com a base de alojamento do postiço (conforme visualizado no projeto convencional). Espera-se ainda obter melhor uniformidade de temperatura e menor tempo de resfriamento.

3.3 SIMULAÇÃO DO RESFRIAMENTO

Para verificar o desempenho térmico dos canais de refrigeração projetados para o estudo, foram realizadas simulações no software de simulação de injeção SOLIDWORKS® 2019 Plastics. O software usa o projeto da refrigeração (via CAD SOLIDWORKS® 2019) e cria a malha sólida dos canais de resfriamento sobre o percurso do fluido (água).

O plástico polipropileno PP01 – *Generic*, encontrado no banco de dados do software, com índice de fluídez de 20 g/10min, similar ao utilizado pela indústria colaboradora, é definido como o material da peça e o aço P20 é definido como material de construção do molde. Os parâmentros técnicos utilizados são mostrados na Tabela 7. A água é selecionada como o fluído refrigerante e sua temperatura de entrada é assumida como em 15 °C, considerando a utilização de uma geladeira no processo de injeção, responsável pela redução da temperatua do fluído. De acordo com as intruções do software SOLIDWORKS® 2019 Plastics, a extração ocorrerá quando 90% da peça atingir a temperatura de extração do polímero definido.

Tabela 7 – Parâmetros de simulação

Configurações de refrigeração	
Temperatura ambiente	30 °C
Temperatura min. do líquido de arrefecimento	15 °C
Temperatura de extração	95 °C
Tubo de resfriamento	
Temperatura de entrada	15 °C
Vazão	150 cm³ / s
Dados gerais	
Temperatura de Fusão (PP01)	230 °C
Temperatura do Molde	50 °C
Tempo de preenchimento	4 s
Pressão de injeção máxima da máquina	150Mpa.
Outros	
Tamanho da malha simulação	2 mm

Fonte: Próprio autor.

De acordo com a referência da Tabela 3, a vazão utilizada para simulação dos sistemas de refrigeração escolhida foi de 150 cm³/s, o que corresponde a 9 l/min. Este valor foi também sugerido pelo software utilizado, para o diâmetro de 10 mm dos canais.

O cálculo do número de Reynolds, conforme Equações 2 e 3, considera a vazão de 150 cm³, diâmetro 10 mm, propriedades físicas da água (conforme Tabela 8) e adotando o circuito de refrigeração como um tubo reto para efeitos de cálculo, apresentou um número de Reynolds acima de 4000, chegando a aproximadamente 16753, caracterizando-se em um fluxo do tipo turbulento, conforme desejado.

Cálculo do número de Reynolds:

$$Q = A.U \qquad (2)$$

$$U = \frac{150\ cm^3.s^{-1}}{0{,}7854\ cm^2} = 190{,}98\ cm/s$$

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu} \qquad (3)$$

$$Re = \frac{999{,}1\frac{kg}{m^3}\ x\ 1{,}9098\ \frac{m}{s}\ x\ 0{,}01m}{1{,}139\ x\ 10^{-3}\ \frac{N.s}{m^2}}$$

$$Re\ \cong\ 16752{,}68$$

Tabela 8 – Propriedades físicas da água

Temperatura (ºC)	Peso específico (kg/m³)	Viscosidade dinâmica (N.s/m²)
15	999,1	1,139 x 10^{-3}

Fonte: Souza (1998).

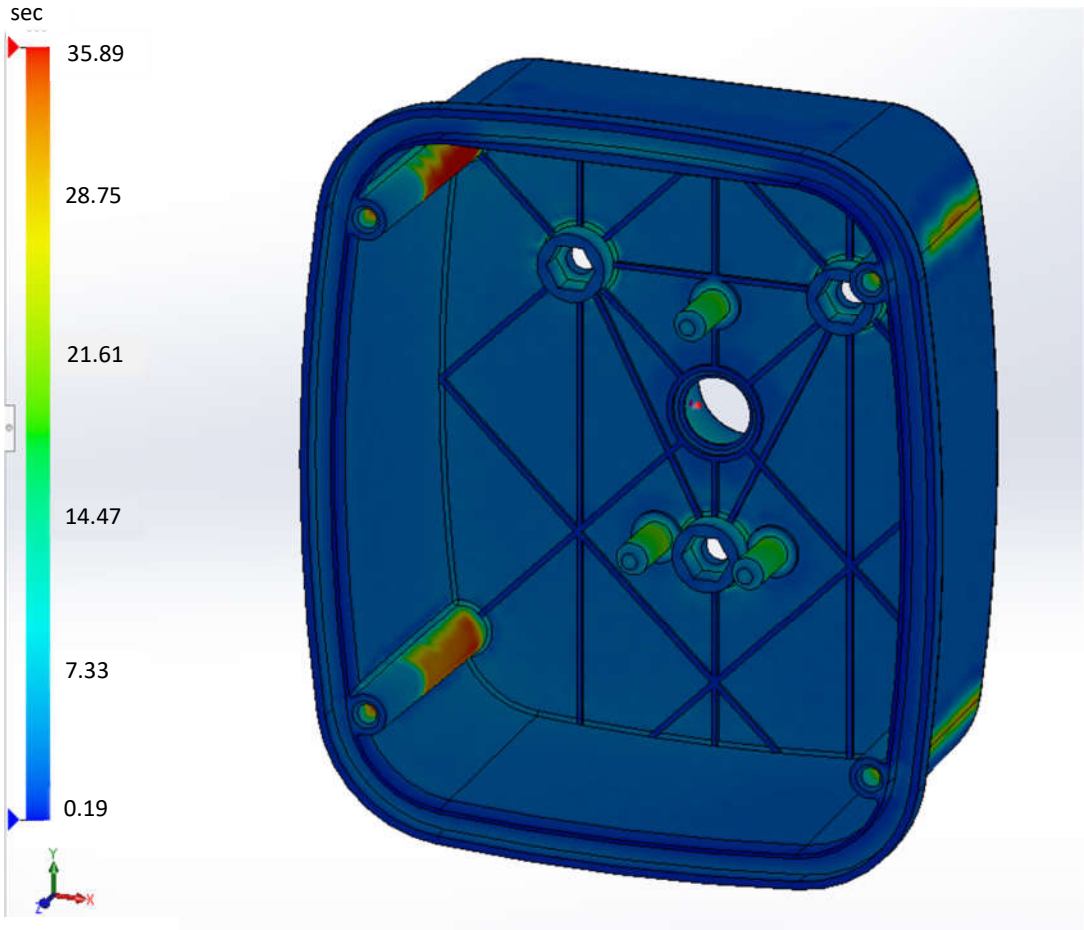
As simulações tomaram em média 6 horas de execução, em um Notebook Dell modelo: P61F, Intel (R) Core (TM) i7-7500, CPU @2.10 GHz 2.90 GHz, 16 GB RAM, placa NVIDIA GeForce 940MX.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 TEMPO DE RESFRIAMENTO DA PEÇA

Os resultados das simulações do tempo de resfriamento da peça são mostrados nas Figuras 29 e 30, para o sistema convencional e *conformal cooling*, respectivamente. Observa-se que o tempo de resfriamento foi encurtado no modelo de refrigeração, *conformal cooling*.

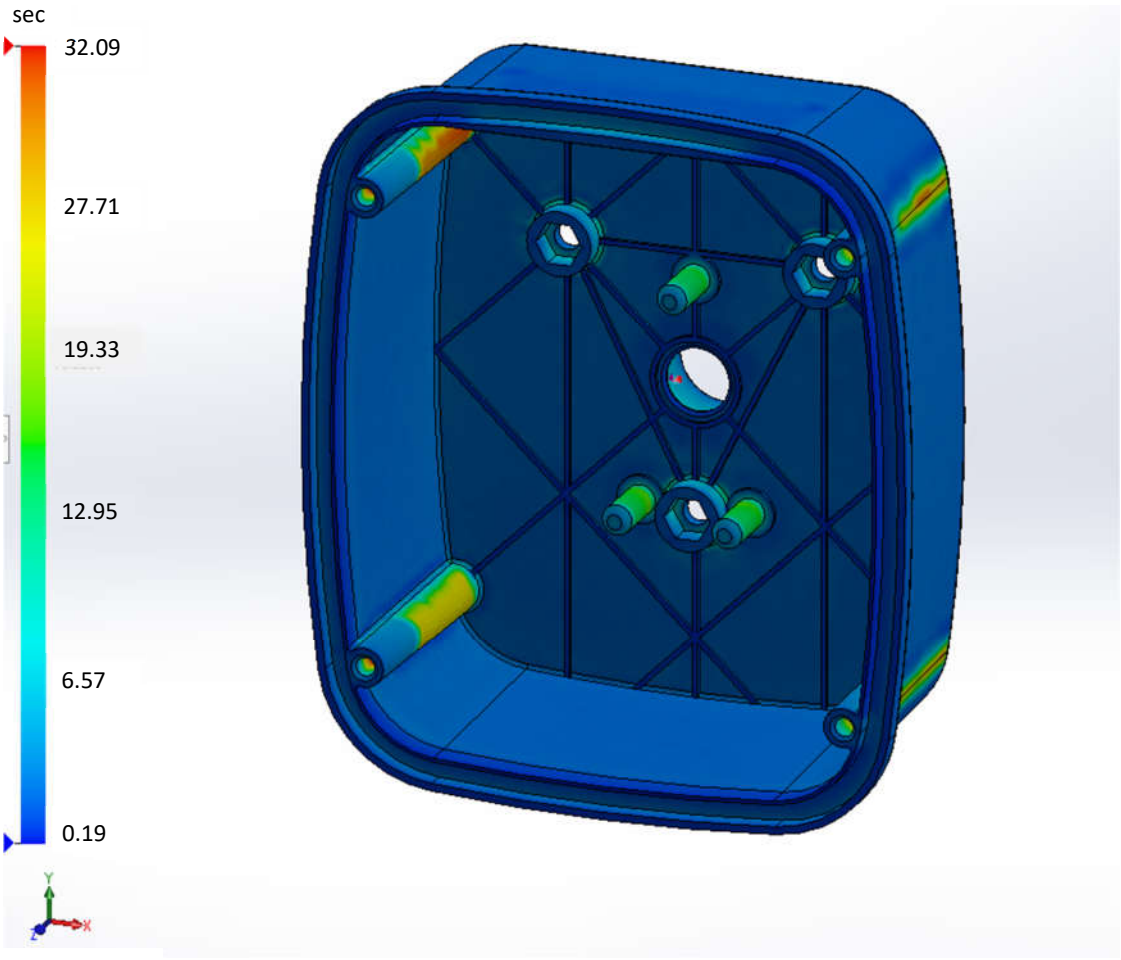
Figura 29 – Tempo de resfriamento da peça (convencional cascata)



***Dimétrica**

Fonte: Próprio autor.

Figura 30 – Tempo de resfriamento da peça (*conformal cooling*)

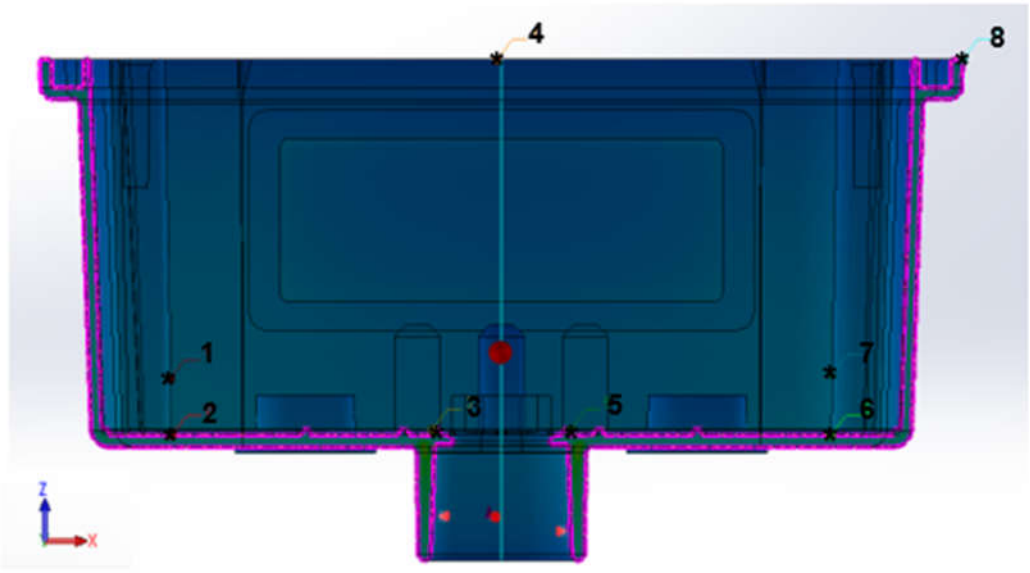


***Dimétrica**

Fonte: Próprio autor.

Observando-se as Figuras 29 e 30, nota-se que a peça refrigerada pelo sistema convencional apresentou o tempo total de resfriamento de 35,89 segundos e para a peça refrigerada pelo sistema *conformal cooling,* apresentou o tempo total de resfriamento de 32,09 segundos, uma redução de 10,59%. Os pontos mostrados pela cor mais próxima de vermelho, são os pontos que levaram o maior tempo de resfriamento. A Figura 31 mostra 8 pontos selecionados para estabelecer uma análise comparativas entre os dois projetos de resfriamento.

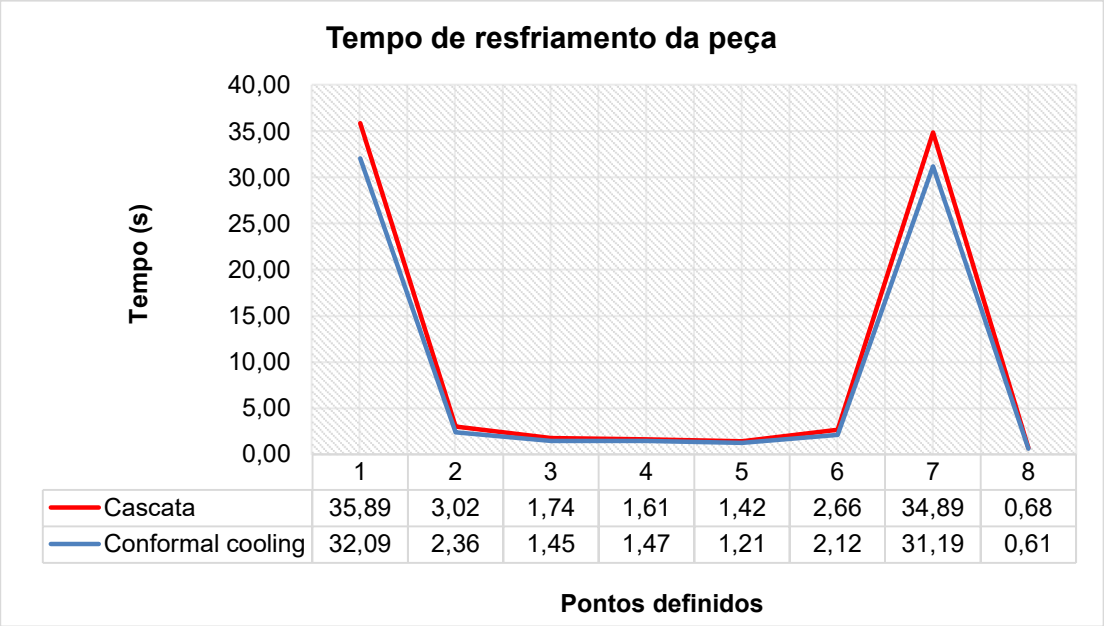
Figura 31 – Pontos selecionados para análise dos dados
(vista de seção lateral)



Fonte: Próprio autor.

Os dados das simulações descritos através dos 8 (oito) pontos identificados na Figura 31, são comparados através da Figura 32.

Figura 32 – Tempo de resfriamento para os 8 pontos da peça selecionados na Figura 31
(convencional cascata versus *conformal cooling*)



	1	2	3	4	5	6	7	8
Cascata	35,89	3,02	1,74	1,61	1,42	2,66	34,89	0,68
Conformal cooling	32,09	2,36	1,45	1,47	1,21	2,12	31,19	0,61

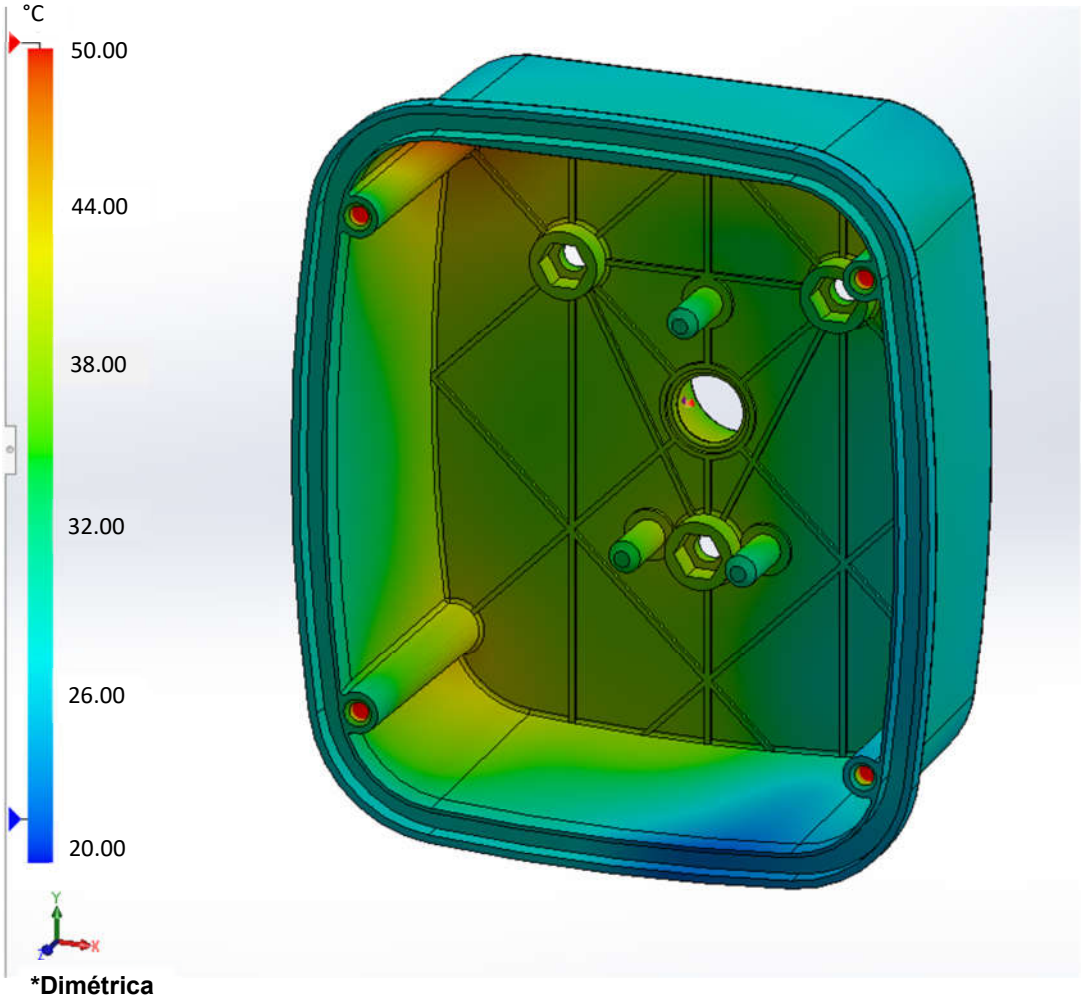
Fonte: Próprio autor.

Nos dois sistemas de refrigeração, os pontos de aquecimento com maiores tempos de resfriamento são os mesmos, conforme esperado devido a geometria da peça e a configuração dos canais de refrigeração projetados.

4.2 TEMPERATURA AO FINAL DO RESFRIAMENTO DA PEÇA

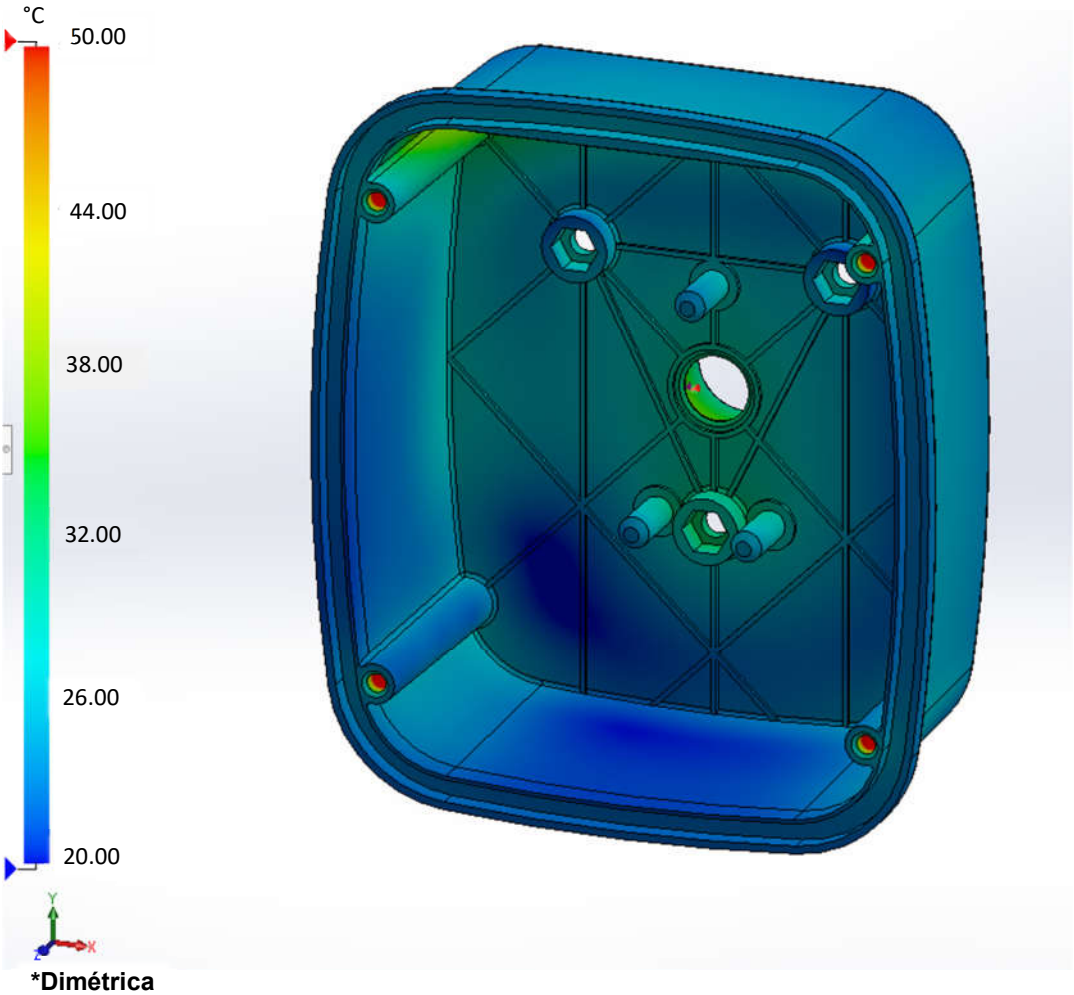
Os resultados das simulações da temperatura da peça ao final do ciclo resfriamento, são mostrados nas Figuras 33 e 34, para o sistema convencional e *conformal cooling*, respectivamente. Observa-se que a temperatura apresentou maior uniformidade no modelo de refrigeração, *conformal cooling*.

Figura 33 – Temperatura para os 8 pontos selecionados na Figura 31 ao final do resfriamento da peça (convencional cascata)



Fonte: Próprio autor.

Figura 34 – Temperatura para os 8 pontos selecionados na Figura 31 ao final do resfriamento da peça (*conformal cooling*)



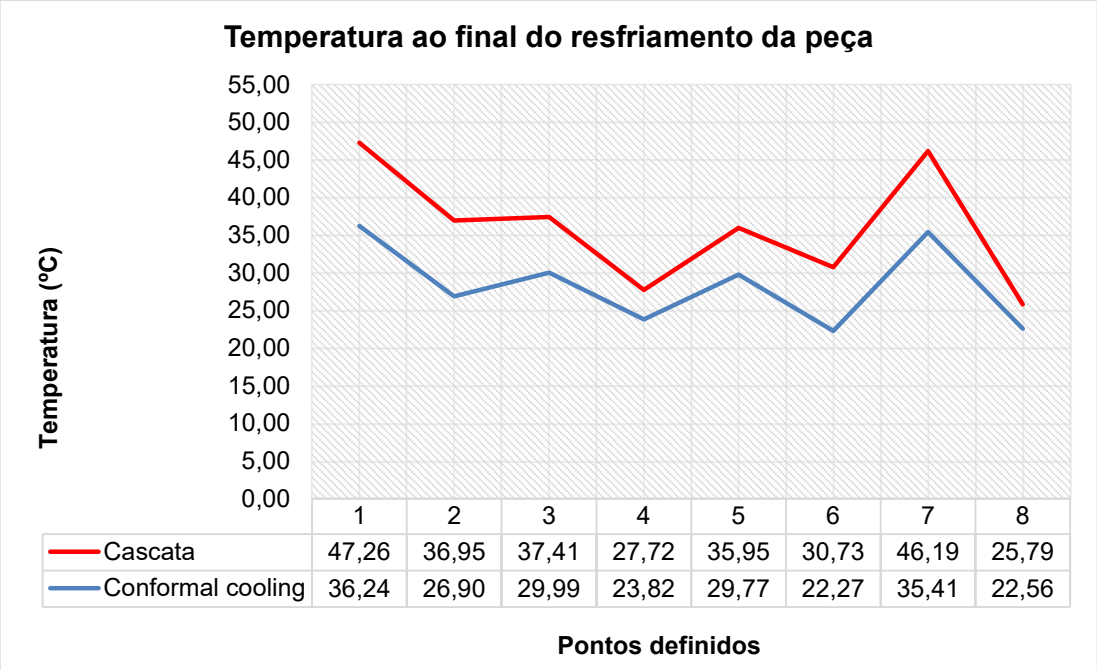
***Dimétrica**

Fonte: Próprio autor.

Os pontos mostrados pela cor mais próxima de vermelho, são os pontos que tiveram maiores temperaturas. Nota-se que a peça refrigerada pelo sistema convencional apresentou uma grande área próxima de 50ºC (próxima da cor amarela e vermelha), diferentemente da peça refrigerada pelo sistema *conformal cooling*, que se manteve abaixo de 40ºC (próxima da cor azul).

Os dados das simulações referente a temperatura na peça descritos através dos 8 (oito) pontos identificados na Figura 31, são comparados através da Figura 35.

Figura 35 – Temperatura para os 8 pontos selecionados na Figura 31 ao final do resfriamento da peça (convencional cascata versus conformal cooling)



	1	2	3	4	5	6	7	8
Cascata	47,26	36,95	37,41	27,72	35,95	30,73	46,19	25,79
Conformal cooling	36,24	26,90	29,99	23,82	29,77	22,27	35,41	22,56

Fonte: Próprio autor.

Nota-se que as magnitudes de temperatura para o sistema de refrigeração *conformal cooling* foram mais baixas e obteve-se maior uniformidade de temperatura quando em comparação com o sistema convencional devido à uniformidade, posicionamento e maior área de distribuição dos canais de refrigeração, conforme mostrado pela Figura 35.

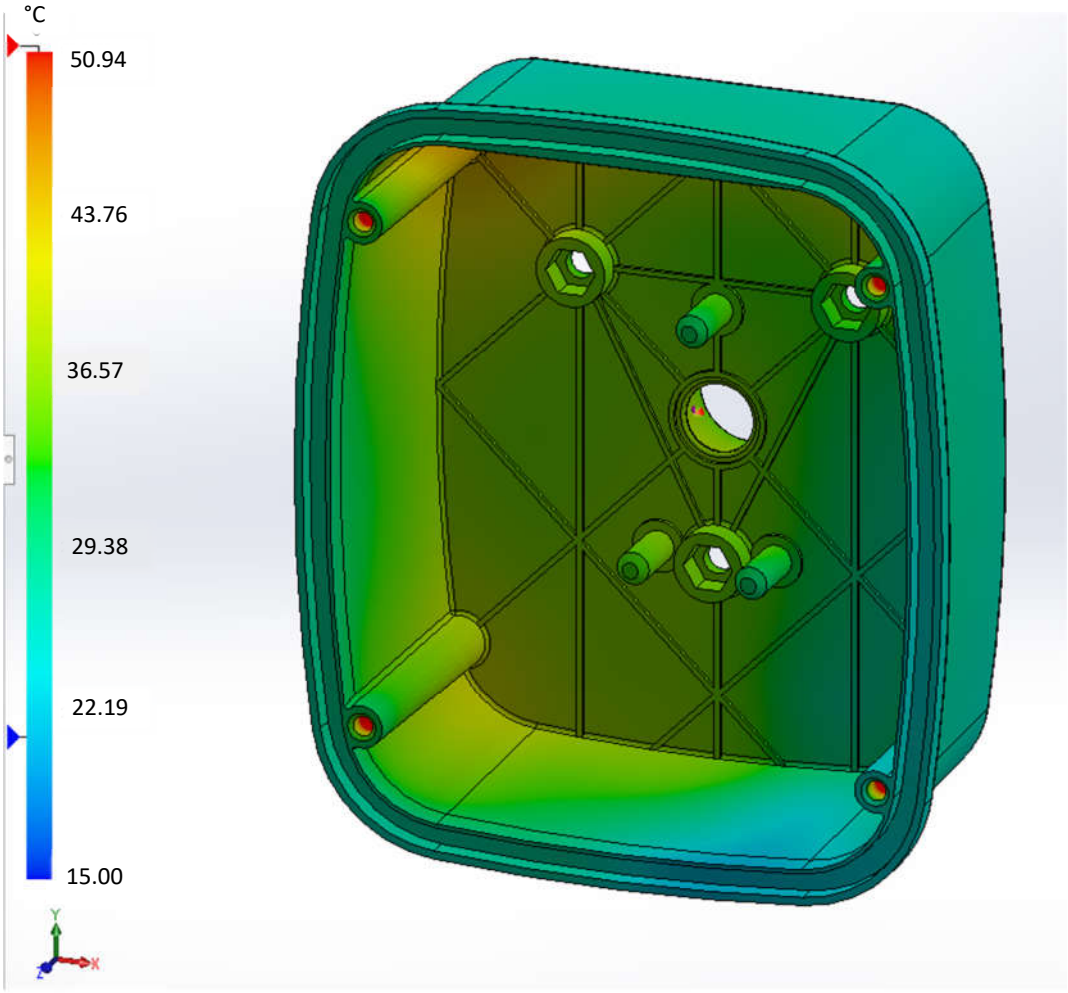
A magnitude de temperatura da peça foi reduzida consideravelmente do intervalo de 25,79°C a 47,26°C no sistema convencional, para 22,27°C a 36,24°C, no sistema *conformal cooling,* uma redução no maior valor de 23,32%. A variação de temperatura na peça também foi reduzida, sendo que no sistema convencional a diferença foi de 21,47°C, e no sistema *conformal cooling* a diferença foi de 13,97°C.

4.3 TEMPERATURA DO MOLDE AO FINAL DO CICLO

Os resultados das simulações da temperatura do molde ao final do ciclo resfriamento da peça, são mostrados nas Figuras 36 e 37, para o sistema

convencional e *conformal cooling*, respectivamente. Observa-se que a temperatura apresentou maior uniformidade no modelo de refrigeração, *conformal cooling*.

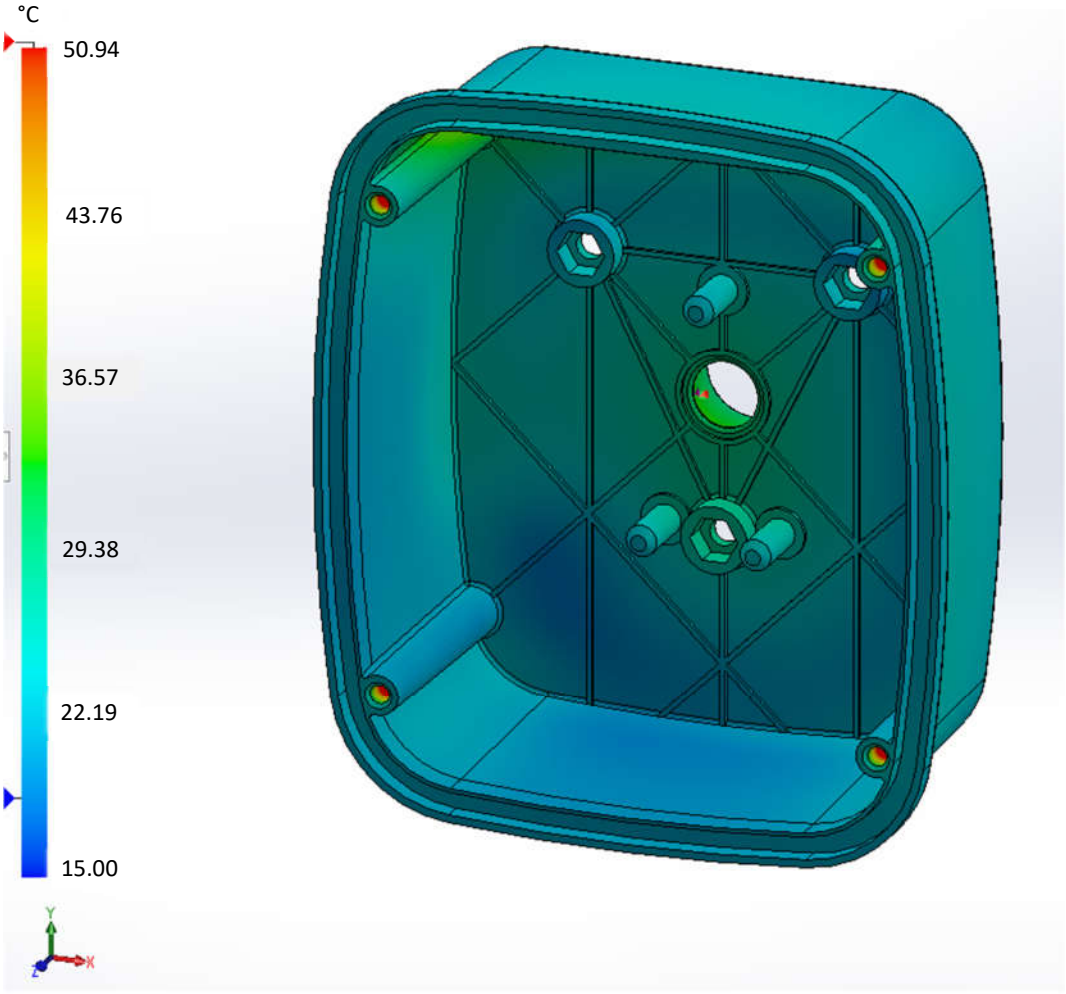
Figura 36 – Temperatura do molde ao final do ciclo (convencional cascata)



***Dimétrica**

Fonte: Próprio autor.

Figura 37 – Temperatura do molde ao final do ciclo (*conformal cooling*)



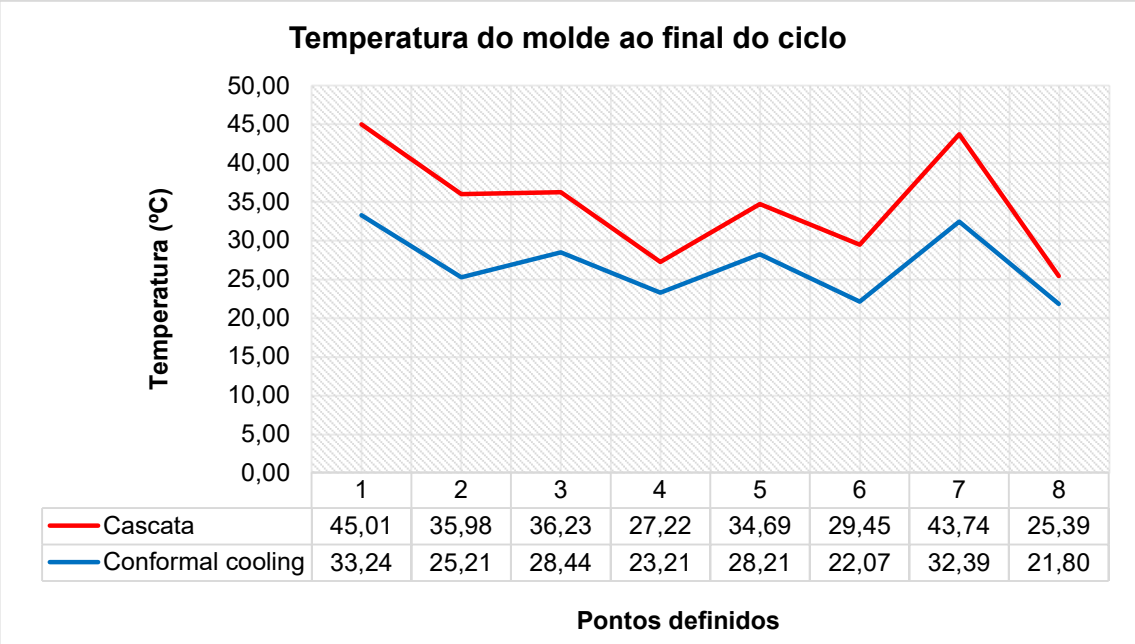
***Dimétrica**

Fonte: Próprio autor.

Os pontos mostrados pela cor mais próxima de vermelho, são os pontos que tiveram maiores temperaturas. Nota-se que a peça refrigerada pelo sistema convencional apresentou uma grande área próxima de 50ºC (próxima da cor amarela e vermelha), diferentemente da peça refrigerada pelo sistema *conformal cooling*, que se manteve abaixo de 40ºC (próxima da cor azul).

Os dados das simulações de temperatura no molde descritos através dos 8 (oito) pontos identificados na Figura 31, são comparados através da Figura 38.

Figura 38 – Temperatura para os 8 pontos selecionados na Figura 31 do molde ao final do ciclo (convencional cascata versus conformal cooling)



	1	2	3	4	5	6	7	8
Cascata	45,01	35,98	36,23	27,22	34,69	29,45	43,74	25,39
Conformal cooling	33,24	25,21	28,44	23,21	28,21	22,07	32,39	21,80

Fonte: Próprio autor.

A magnitude de temperatura do molde ao término do ciclo, como visualizado na Figura 38, foi reduzida do intervalo de 25,39°C a 45,01°C, no sistema convencional, para 21,80°C a 33,24°C no sistema *conformal cooling,* uma redução no maior valor de 26,14%. A variação de temperatura na peça também foi reduzida, sendo que no sistema convencional a diferença foi de 19,62°C, e no sistema *conformal cooling* a diferença foi de 11,44°C.

5 CONCLUSÃO

Baseado nos resultados discutidos neste estudo, temos, portanto, as seguintes conclusões:

1. O molde de injeção com canais do tipo *conformal cooling* proporciona uma economia significativa de tempo de resfriamento de aproximadamente 10,6% em comparação com o método de furação convencional estudado.

2. A temperatura da peça e do molde foram reduzidas em mais de 23% no método *conformal cooling* proposto. Também pode-se observar a distribuição mais homogênea na peça. Estes fatores garantem melhor qualidade do produto moldado e menores possibilidades de quaisquer defeitos provenientes da refrigeração inadequada, especialmente no caso de plásticos cristalinos como o PP.

O sistema de refrigeração proposto visando as possibilidades de fabricação por meio da MA, demonstrou conforme simulação numérica que o *conformal cooling* pode reduzir o tempo de ciclo e baixar as temperaturas na peça e no molde, comprovando o resultado aprimorado deste sistema de refrigeração.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O estudo realizado utilizou um molde de uma peça (carcaça de lanterna automotiva) de modelo comum presente na indústria de autopeças. Sendo assim, pode-se sugerir para pesquisas futuras a utilização de modelos mais complexos, onde a refrigeração tradicional seria ainda mais limitada. O estudo mencionou a necessidade de pós-processamento do ferramental fabricado por MA, mas não realizou nenhum experimento relacionado as propriedades mecânicas e térmicas do material ou análises quanto a pressão e força de fechamento durante a injeção, sendo outra oportunidade de pesquisa. A diferença entre os dois projetos também apresentará mudanças nos custos de fabricação e manutenção do molde, outra sugestão interessante para estudo futuro.

REFERÊNCIAS

AGAZZI, A. et al. Optimal cooling design in injection moulding process e a new approach based on morphological surfaces. **Applied Thermal Engineering,** vol.52, p.170-178, 2013.

AKIN, J. E. **Finite Element Analysis Concepts via SolidWorks.** 1º ed. 303p. Rice University, Houston. World Scientific: 2009.

ALBERTI, E. A. et al. Manufatura Aditiva: o papel da soldagem nesta janela de oportunidade. **Soldagem & Inspeção.** São Paulo, v.19, n.2, p.190-198, 2014. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242014000200011&lng=en&nrm=iso >. Acesso em: 01 out. 2018. http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/SI1902.11.

ALTAF, K.; RANI, A. M. A.; RAGHAVAN, V. R. Prototype production and experimental analysis for circular and profiled conformal cooling channels in aluminum filled epoxy injection mould tools. **Rapid Prototyping Journal,** vol.19, n.4, p. 220-229, 2013.

ALTAF, K. et al. Determining the effects of thermal conductivity on epoxy molds using profiled cooling channels with metal inserts**. Journal of Mechanical Science and Technology,** vol.30, p.4901-4907, 2016.

ASTM F3187-16. **Standard guide for directed energy deposition of metals.** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016. Disponível em: < http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?F3187 > Acesso em: 14 set. 2018.

BAHNINI, I. et al. Additive Manufacturing technology: the status, applications, and prospects. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol.97, p.147-161, 2018. https://doi-org.ez67.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s00170-018-1932-y.

DEBROY, T. et al. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. **Progress in Materials Science,** vol.92, p.112–224, 2018.

DIMLA, D.E. et al. Design and optimisation of conformal cooling channels in injection moulding tools. **Journal of Materials Processing Technology,** vol.164–165, p.1294–1300, 2005.

DOWDEN, J. **The Theory of Laser Materials Processing:** Heat and Mass Transfer in Modern Technology**.** Berlin: Springer Science & Business Media, 2009.

FLYNN, J. M. et al. Hybrid additive and subtractive machine tools – research and industrial developments. **International Journal of Machine Tools & Manufacture,** vol.101, p.79–101, 2016.

GIBSON, I. et al. **Additive manufacturing technologies**. 2ª. ed. New York: Springer, 2015.

GORNI, A. A. Introdução à prototipagem rápida e seus processos. **Plástico Industrial**, p. 230-239, 2001.

GROOVER, M.P. **Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems**. 4th Edition. John Wiley & Sons, Inc; 2010.

GUILONG, W. et al. Analysis of thermal cycling efficiency and optimal design of heating/cooling systems for rapid heat cycle injection molding process. **Materials & Design**. 2010, vol.31, n.7, p.3426-3441. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.01.042.

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

ILYAS, I.P. **Production of plastic injection moulding tools using selective laser sintering and high speed machining.** Tese (doutorado em filosofia) - University of Leeds School of Mechanical Engineering, UK, 2007.

JAHAN, S. A.; EL-MOUNAYRI, H. Optimal conformal cooling channels in 3D printed dies for plastic injection molding. **Procedia Manufacturing,** vol.5, p.888–900, 2016.

KITAYAMA, S. et al. Multi-objective optimization of injection molding process parameters for short cycle time and warpage reduction using conformal cooling channel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 88, n. 5–8, p. 1735–1744, 2017.

KUO, C.; XU, W. Effects of different cooling channels on the cooling efficiency in the wax injection molding process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol.98(1), p.887-895, 2018.

KUO, C.-C. et al. Development of a low-cost wax injection mold with high cooling efficiency. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 93, n. 5–8, p. 2081–2088, 2017.

KARUNAKARAN, K. et al. Retrofitment of a CNC machine for hybrid layered manufacturing. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v.45, n.7/8, p.690–703, 2009. Disponível em: <http://search-ebscohost-com.ez67.periodicos.capes.gov.br/login.aspx?direct=true&db=aph&AN=44917630&lang=pt-br&site=ehost-live>. Acesso em: 10 out. 2019.

LI, W. et al. Directed energy depositing a new Fe-Cr-Ni alloy with gradually changing composition with elemental powder mixes and particle size' effect in fabrication process. **Journal of Materials Processing Tech.,** vol.255, p.96-104, 2018.

LI, Z. et al. Topology Optimization for the Design of Conformal Cooling System in Thin-wall Injection Molding Based on BEM. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 94, n. 1–4, p. 1041–1059, 2018.

LIU, C. et al. Experimental comparison of the flow rate and cooling performance of internal cooling channels fabricated via selective laser melting and conventional drilling

process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 96, n. 5–8, p. 2757–2767, 2018.

LUCAS, A. A.; LOTTI, C.; PESSAN, L. A. **Moldagem por Injeção de Termoplásticos**. Apostila do Curso de Processamento de Termoplásticos, Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia de Materiais, Núcleo de Reologia e Processamento de Polímeros, São Carlos, 2018.

MARQUES, S. et al. Design of conformal cooling for plastic injection moulding by heat transfer simulation. **Polímeros**, São Carlos, v.25, n.6, p.564-574, 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282015000600564&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 12 fev. 2019. http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.2047.

MANRICH, S. **Processamento de Termoplásticos: Rosca Única, Extrusão e Matrizes, Injeção e Moldes**. p. 431 São Paulo: Artliber, 2005.

MARTINEZ, F. M. **Análise dos efeitos do conformal cooling em injeção de termoplástico através de simulação: estudo de caso.** 2019. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia de Materiais). Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia de Materiais, São Carlos, 2019.

MARTOWIBOWO, S.Y.; KASWADI, A. Optimization and simulation of plastic injection process using genetic algorithm and moldflow. **Chin. J. Mech. Eng.** vol.30, p.398–406, 2017.

MAYER, S. Optimised mould temperature control procedure using DMLS. **EOS Whitepaper**, p. 1-10, EOS GmbH Ltd: 2005.

MAZUR, M. et al. Numerical and experimental evaluation of a conformally cooled H13 steel injection mould manufactured with selective laser melting**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 93, n. 1–4, p. 881–900, 2017.

MIRANDA, D. A.; NOGUEIRA, A. L. Simulation of an Injection Process Using a CAE Tool: Assessment of Operational Conditions and Mold Design on the Process Efficiency. **Materials Research**, São Carlos, 2019, v.22, n.2, e20180564. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392019000200212&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 03 jul. 2019. http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2018-0564.

NEWMAN, S. T. Process planning for additive and subtractive manufacturing Technologies. CIRP Annals. **Manufacturing Technology**, vol.64, ed.1, p.467-470, 2015.

PARK, H.; DANG, X. Optimization of conformal cooling channels with array of baffles for plastic injection mold. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing,** vol. 11, n. 6, p. 879-890, 2010.

PARK, H.; DANG, X. Development of a smart plastic injection mold with conformal cooling channels**. Procedia Manufacturing,** vol.10, p.48 – 59, 2017.

PÖTSCH, G.; MICHAELI, W. **Injection molding: an introduction [M].** Munich: Hanser Verlag, 2008.

RAULINO, B. R. **Manufatura aditiva: desenvolvimento de uma máquina de prototipagem rápida baseada na tecnologia FDM (modelagem por fusão e deposição).** Trabalho de graduação em engenharia de controle e automação. Faculdade de tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 142p, 2011.

SACHS, E. et al. Production of injection molding tooling with conformal cooling channels using the three dimensional printing process. **Polymer Engineering and Science**, vol.40, n.5, p.1232–1247, 2000.

SILVA, S.L. **Sistemática para o projeto do sistema de refrigeração de moldes para injeção de polímeros.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de pós-graduação em engenharia mecânica. Florianópolis/SC, 2009.

SIMHAMBHATLA, S.; KARUNAKARAN, K. Build strategies for rapid manufacturing of components of varying complexity. **Rapid Prototyping Journal**, vol. 21, n.3, p. 340-350, 2015. https://doi-org.ez67.periodicos.capes.gov.br/10.1108/RPJ-07-2012-0062.

SOUZA, J. L. M. Propriedades físicas da água. **Departamento de Solos e Engenharia Agrícola**, UFPR 1998. Disponível em: <http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/raspa/U_I02_propriedades_da_agua.pdf> Acesso em: 04 jul. 2019.

SOLIDWORKS. Solidworks Plastics 2019. **Site do fabricante**. Disponível em: < https://www.solidworks.com/pt-br/product/solidworks-plastics> Acesso em: 05 fev. 2020.

STEINKO, W. Avaliação do projeto térmico do molde garante qualidade e redução de custos. **Plástico Industrial**, ano VI, p. 64-71, Novembro, 2004.

TERRASSA, K. L. et al. Reuse of powder feedstock for directed energy deposition. **Powder Technology vol.338,** p.819–829, 2018.

THOMPSON, S. M. et al. An overview of direct laser deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics. **Additive Manufacturing**, vol. 8, p.36-62, 2015.

VOJNOVÁ, E. The benefits of a conforming cooling systems the molds in injection moulding process. **Procedia Engineering**, vol.149, p.535 – 543, 2016.

WANG, Y. et al. Spiral and conformal cooling in plastic injection molding. **Computer-Aided Design,** vol.63, p.1–11, 2015.

WIRTH, F. et al. Analysis of melt pool dynamics in laser cladding and direct metal deposition by automated high-speed camera image evaluation. **Additive Manufacturing**, ISSN: 2214-8604, vol. 21, p.369-382, 2018.

WOHLERS, T. **Wohlers report 2012: Additive manufacturing and 3D printing, state of the industry**. Colorado, USA: Wohlers Associates, 2012.

WOLFF, S. et al. Anisotropic properties of directed energy deposition (DED)-processed Ti–6Al–4V. **Journal of Manufacturing Processes,** vol.24, p.397-405, 2016.

YANG, Y. P. et al. Prediction of microstructure, residual stress, and deformation in laser powder bed fusion process. **Computational Mechanics,** vol.61, p.599–615, 2018.

ZHAI, Y. et al. Additive manufacturing: making imagination the major limitation. **Jom**, v. 66, n. 5, p. 808-816, 2014.

ZHANG, Y. et al. A rapid BEM-based method for cooling simulation of injection molding. **Engineering Analysis with Boundary Elements,** vol.52, p.110–119, 2015.