

A IMPORTÂNCIA DAS SIMULAÇÕES NA MANUFATURA ADITIVA DE MOLDES MECÂNICOS

The Importance of Simulations in Additive Manufacturing of Mechanical Molds

Marcelo Lopes¹ 

Cleiton Tamanini² 

Filipe Wiltgen³ 

Fábio Cruz⁴ 

Resumo: Projetos mais complexos e personalizados principalmente os produzidos via a manufatura formativa com uso de moldes mecânicos parecem ser uma alternativa importante para indústria mundial. Entretanto, para a construção destes moldes complexos é necessário a utilização da manufatura aditiva para sua construção, quer seja pela própria complexidade, quer seja pela necessidade de resfriamento adequado dos moldes. Seja qual for o motivo, a manufatura aditiva permite que projetos complexos sejam executados e fabricados de forma mais eficiente. O objetivo deste artigo é apresentar a importância do uso de simulações computacionais no desenvolvimento dos projetos de molde por manufatura aditiva e viabilizar a construção, visto que isso reduz o tempo de fabricação e na assertividade durante a realização de testes para avanço da maturidade tecnológica. No decorrer deste artigo tem-se um estudo de caso com aplicação de simulação computacional de injeção de polímeros como ferramenta no desenvolvimento de moldes mecânicos construídos em manufatura aditiva com diferentes tipos de canais de refrigeração. Para este estudo de caso é considerado uma peça com geometria de grande dificuldade construtiva em manufatura formativa. Os resultados obtidos indicam que a utilização correta de canais de refrigeração projetados e construídos via manufatura aditiva pode aumentar a produção em manufatura formativa de forma consideravelmente importante. Por fim, são apresentados e discutidos os resultados e a conclusão.

Palavras-chave: Simulação Computacional, Manufatura Aditiva, Moldes Mecânicos.

¹Engenheiro Mecânico, Mestrando em Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, marcelolopes5x@gmail.com.

²Engenheiro Mecânico, Mestrando em Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, cleitontamanini@hotmail.com.

³Engenheiro Eletricista e Professor Doutor em Engenharia de Fusão Termonuclear Controlada, Universidade de Taubaté, Instituto Federal de São Paulo (IFSP-Campinas) e Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo (FATEC-Pindamonhangaba), LFWBarbosa@gmail.com, Filipe.Wiltgen@unitau.br ou Filipe.Wiltgen@ifsp.edu.br.

⁴Graduando Engenharia Mecânica, Universidade Nove de Julho, fabio.sena.cruz@gmail.com.

Abstract: More complex and customized projects, mainly those produced via formative manufacturing using mechanical molds, seem to be an important alternative for the world industry. However, for construction of these complex molds, it is necessary to use additive manufacturing for their construction, either because of complexity itself, or because of need for adequate cooling of the molds. Whatever the reason, additive manufacturing allows complex designs to be executed and manufactured more efficiently. The objective of this paper is to present the importance of using computer simulations in development of mold designs by additive manufacturing and to enable construction, as this reduces manufacturing time and assertiveness during tests to advance technological maturity. In course of this paper there is a case study with application of computer simulation of polymer injection as a tool in development of mechanical molds built in additive manufacturing with different types of cooling channels. For this case study, a part with geometry of great constructive difficulty in formative manufacturing is considered. The results obtained indicate that correct use of cooling channels designed and built via additive manufacturing can significantly increase production in formative manufacturing. Finally, the results and conclusion are presented and discussed.

Keywords: Computational Simulation, Additive Manufacturing, Mechanical Molds.

1 INTRODUÇÃO

A utilização de polímeros em processos de manufatura formativa produz peças de forma muito rápida, com menor custo se comparado com processo de produção de peças metálicas devido a menor densidade e a não obrigatoriedade de acabamento superficial após a produção da peça, com isso pode ser aplicada em diversos setores industriais, como o automotivo, de agronegócios, eletrônicos, construção civil e alimentos.

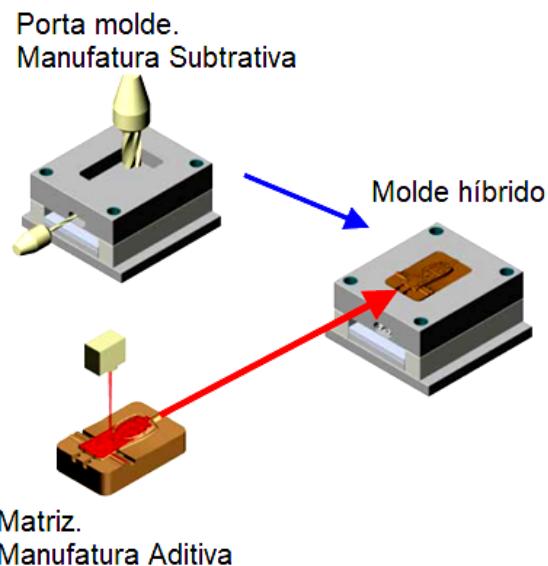
A Associação Brasileira do Plástico (ABIPLAST) diz que cerca de 33% da transformação de plástico nacional é realizada por esse método de manufatura (ABIPLAST, 2018). A evolução das propriedades mecânicas, alta produtividade e qualidade superficial fazem da manufatura formativa uma importante forma de produção mundial de peças (ABIPLAST, 2018; HARADA; UEKI, 2012; MARQUES *et al.*, 2015; SILVA, 2009).

Os moldes mecânicos utilizados em manufatura formativa se destacam como uma importante ferramenta no processo de fabricação mundial (BARETA, 2007; DOMINGUES, 2015; HARADA, 2004; MARQUES *et al.*, 2015). De fato, a evolução da Manufatura Aditiva (MA) tornou capaz a construção de moldes mecânicos mais eficientes, utilizando diversos materiais e técnicas (WILTGEN, 2019; WILTGEN 2021A; ALCALDE; WILTGEN 2019; GOMES; WILTGEN, 2020). Sem duvidas, é possível unir as manufaturas aditiva e subtrativa para o desenvolvimento de moldes mecânicos com diferentes opções construtivas, o que inclui a fabricação de moldes híbridos, com matrizes fabricadas em resinas ou metais (LOPES; WILTGEN, 2021A; LOPES; WILTGEN, 2021B; WILTGEN, 2019; WILTGEN, 2021A; ALCALDE; WILTGEN 2019; GOMES; WILTGEN, 2020). Na Figura 1 pode ser observado o processo de fabricação de um molde mecânico híbrido.

Fabricação de moldes híbridos tem se mostrado uma solução inovadora e eficiente para a construção das matrizes do molde e pode substituir a fabricação em manufatura subtrativa, chamada de convencional (DOMINGUES, 2015; MARTINHO, 2010; SHINDE; ASHTANKAR, 2017; VASCONCELOS, 2014; MIRANDA, 2017). Neste contexto, a simulação computacional é uma realidade presente durante a execução de todos os

projetos de moldes mecânicos, assim como, em diversos outros projetos em engenharia nas mais diversas áreas (BARETA, 2007; DOMINGUES, 2015; GRIES *et al.*, 2021).

Figura 1 - Fabricação de um molde mecânico do tipo híbrido.



Fonte: Adaptado de Martinho, 2010 e Domingues, 2015.

Em MA os moldes mecânicos protótipos podem ser construídos com uma complexidade muito maior do que em manufatura subtrativa, porém, devido a limitações técnicas provocadas pelos parâmetros de temperatura, pressão e tempo podem comprometer determinadas características geométricas dos moldes mecânicos (LOPES; WILTGEN, 2020; LOPES; WILTGEN, 2021A; LOPES; WILTGEN, 2021B; TUTESKI; KOČOV, 2018; VIETEN *et al.*, 2021).

Com a utilização da MA é possível projetar canais de refrigeração mais eficientes e com a possibilidade de construções geométricas complexas que permitem acompanhar o formato da peça a ser fabricada (ALCALDE; WILTGEN, 2019; TUTESKI; KOČOV, 2018; WILTGEN, 2019; GOMES; WILTGEN, 2020; WILTGEN, 2021A, TAMANINI; WILTGEN, 2021A; TAMANINI; WILTGEN, 2021B) o que consequentemente conduz a melhor qualidade e maior produtividade (GRIES *et al.*, 2021; HATOS; KOCSIS; HARGITAI; 2018;

JUNIOR; COSTA, 2019; VOJNOVÁ, 2016; PARK; DANG, 2017; MIRANDA, 2017).

Esta pesquisa tem como objetivo apresentar a importância das informações obtidas nas simulações computacionais com moldes mecânicos industriais no âmbito da manufatura aditiva utilizando um estudo de caso, mostrando que estas informações são imprescindíveis para a eficiência no processo de fabricação de moldes em protótipos de modelos digitais em 3D, assim como, protótipos físicos reais acelerando o entendimento da informação para viabilizar alcançar elevados níveis de maturidade tecnológica (*TRL – Technology Readiness Level*) permitindo que um produto seja comercializado mais rapidamente (WILTGEN, 2021A; WILTGEN, 2021B).

A relevância desta pesquisa vem do fato de que existe a necessidade premente de inovação nos processos de produção de moldes industriais, tornando-os mais rápidos de serem fabricados, mais eficientes na extração do calor e resfriamento das peças, e assim, muito mais eficientes na produtividade e redução de ciclo de fabricação em manufatura formativa. Isso tudo contribui para que a indústria seja mais eficiente, lucrativa e com menor impacto ambiental na produção (KELLENS *et al.*, 2017).

2 PROJETOS DE MOLDES MECÂNICOS VIA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

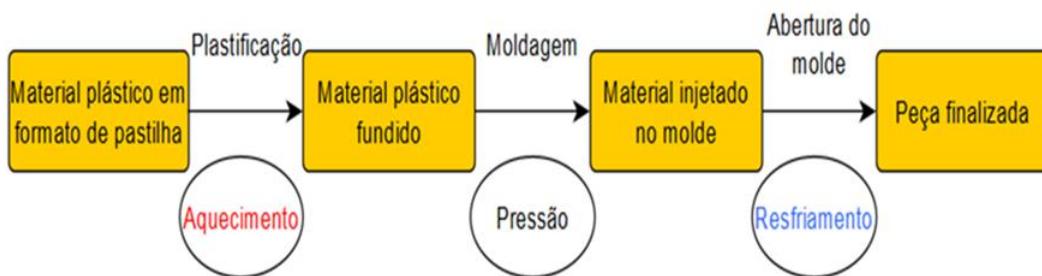
Os processos industriais têm como uma de suas principais metas a redução dos custos e aumento de produtividade, uma das formas de fabricação que possui o menor custo por peça fabricada é a manufatura formativa. Neste contexto, a fabricação via moldes mecânicos por injeção se caracteriza pela boa velocidade de produção, aliada a possibilidade de construção de peças relativamente complexas, boa precisão e bom acabamento superficial, além da importante redução de custos para produção de peças em grande escala se comparada com processo tradicional de injeção de matérias-primas metálicas (ALBA *et al.*, 2020; TUTESKI; KOČOV, 2018).

O processo de manufatura formativa mais utilizado é baseado na inserção de matéria-prima do tipo polímero aquecido, que se transforma em

uma massa fluida e viscosa, vindo a se solidificar novamente quando resfriada, retornando a seu estado natural (LOPES; WILTGEN, 2021A; LOPES; WILTGEN, 2021B). O fluxograma deste processo pode ser descrito de maneira simplificada conforme pode ser visto na Figura 2.

Na Figura 2, a matéria-prima em estado sólido é inserida em uma máquina que a derreterá e injetará na forma fluida, ficando fundida de forma homogênea, a qual é inserida sob pressão na cavidade oca do molde mecânico e mantida na cavidade até que seja resfriada e volte a se solidificar. Após isso, o molde mecânico é aberto e a peça é extraída e imediatamente se inicia um novo ciclo (ALBA *et al.*, 2020; ASNAFI *et al.*, 2020; BARETA, 2007; DE BLASIO, 2007; DOMINGUES, 2015; HARADA, 2004; MARQUES *et al.*, 2015; MIRANDA, 2017).

Figura 2 - Representação do ciclo de manufatura formativa típica.



Fonte: Próprios Autores.

Considerando que a construção de um molde mecânico industrial representa um custo de investimento consideravelmente alto no processo, seu desenvolvimento deve ser capaz de intervir em todos os eventos que possam tornar o molde mecânico inútil ou pouco eficiente. A quantidade de partes necessárias para compor um molde mecânico possui junções que quase sempre são um problema no acabamento das peças (rebarbas), a localização dos pontos de injeção deve ser escolhida no molde para que a cavidade oca possa ser completamente preenchida.

Outro fator de extrema importância nos moldes mecânicos são circuitos de refrigeração eficientes visando diminuir o ciclo de produção (GRIES *et al.*, 2021; HARADA; UEKI, 2012; WANG; YU; WANG, 2015; VASCONCELOS,

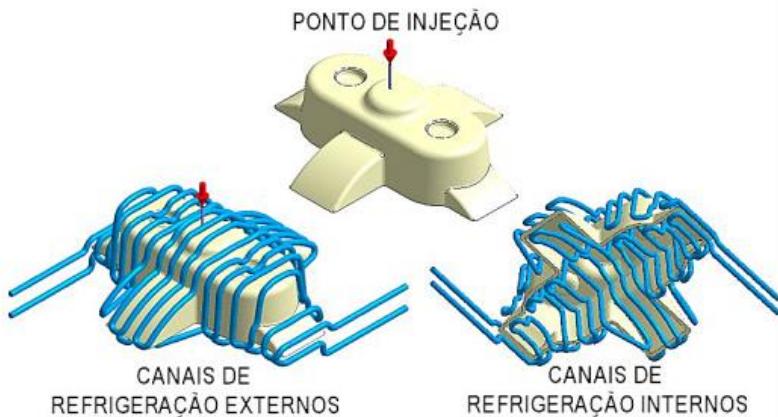
2014; VIETEN *et al.*, 2021; BROTAN; BERG; SORBY, 2016). Isso mostra a importância da realização de ensaios e testes em modelos digitais em 3D (simulações computacionais e desenhos dos modelos em CAD) além dos ensaios e testes físicos reais (protótipos físicos experimentais).

Geralmente, moldes mecânicos são projetados com muitas cavidades, desde que adequados a capacidade da máquina responsável pela injeção (injetora). O projeto dos canais de refrigeração é fundamental para o desempenho do molde mecânico, canais de refrigeração fabricados via manufatura subtrativa não são eficientes e não conseguem refrigerar o molde de forma uniforme (DIMLA *et al.*, 2018; SHAYFULL *et al.*, 2013). Isso porque canais de refrigeração fabricados em manufatura subtrativa são construídos linearmente devido as limitações deste modo de fabricação (FENG; KAMAT; PEI, 2021).

A utilização de manufatura subtrativa em moldes mecânicos não alcança a eficiência dos canais de refrigeração fabricados em manufatura aditiva. Além da baixa eficiência na extração de calor, demoram muito tempo para serem fabricados, podem inviabilizar o molde, produzir peças defeituosas, incompletas, deformadas, empenadas, com tensões estruturais, entre muitos outros problemas. De fato, com o advento da manufatura aditiva abriram-se possibilidades para o desenvolvimento de canais de refrigeração distribuídos, capilares e ramificados ao redor das cavidades das peças no molde mecânico de forma a refrigerar a peça de uma forma mais adequada, aumentando muito a cadênciа de fabricação (ASNAFI *et al.*, 2020; CHUNG, 2019; GRIES *et al.*, 2021; HATOS; KOCSIS; HARGITAI; 2018; JUNIOR; COSTA, 2019; SILVA, 2009; SINGH; ARORA, 2019; SOUZA; MARQUES, 2014; ALBA *et al.*, 2020).

Na Figura 3 é possível observar uma estrutura de molde mecânico com dois diferentes circuitos de refrigeração ramificados e distribuídos acompanhando a geometria da peça. A primeira etapa da manufatura aditiva consiste na modelagem digital em 3D do projeto.

Figura 3 - Circuitos de refrigeração fabricados via manufatura aditiva.



Fonte: Adaptado de ALBA *et al.*, 2020.

Os modelos digitais em 3D do projeto permitem correções e modificações necessárias com maior eficiência, ajudando a verificar e corrigir possíveis falhas estruturais no decorrer do desenvolvimento do projeto. Visualizar a forma geométrica da peça em diferentes posições e em três dimensões permite a compreensão volumétrica.

Com os resultados obtidos das informações das simulações computacionais, é possível adaptar os modelos digitais em 3D, e novamente testar até que os resultados sejam adequados para a fabricação em manufatura aditiva (WILTGEN, 2019; WILTGEN, 2021A; GOMES; WILTGEN, 2020; ALCALDE; WILTGEN, 2018; LOPES; WILTGEN, 2021A). Estas simulações computacionais fornecem informações importantes das peças quando em uma operação de fabricação simulada, mostrando como ficam os mapas de temperatura e pressão do fluido na cavidade do modelo do molde mecânico em teste digital. Os resultados obtidos e analisados referentes ao comportamento do molde mecânico digital em teste apresenta o comportamento da peça em operação simulada e apontam as necessidades de mudanças e alterações no projeto para que os resultados sejam melhorados.

A partir desta etapa podem ser realizadas as alterações necessárias no projeto inicial, tanto na estrutura do molde mecânico quanto nos projetos de canais de refrigeração, com o objetivo de resolver problemas encontrados nas simulações computacionais, e assim, melhorar a eficiência e o desempenho. Com o projeto revisado a partir das informações das simulações, retoma-se o

processo de simulações, completando quantos ciclos forem necessários até que seja satisfeita o requisito de projeto. Esse processo economiza tempo e custo de fabricação identificando possíveis problemas e imperfeições que surgem durante as simulações (GRIES *et al.*, 2021).

A utilização de simulação representa uma evolução importante e imprescindível no processo de fabricação moderno, pois reduz a possibilidade de falhas no projeto de moldes mecânicos, o que contribui com as etapas de testes de protótipo digitais, e também, viabiliza a construção dos protótipos físicos reais o que reduz o tempo, custo e desperdícios de matéria-prima, o que acelera consideravelmente a maturidade tecnológica (*TRL*) do projeto permitindo encurtar o atendimento e a redução do ciclo produtivo, além de atender a exigências ambientais com projetos industriais mais sustentáveis (WILTGEN, 2019; WILTGEN, 2021B).

3 IMPORTÂNCIA DAS SIMULAÇÕES E SUA APLICAÇÃO NA MANUFATURA ADITIVA

Em processos de manufatura subtrativa a construção de canais de refrigeração complexos é inviável, os moldes mecânicos acabam limitados a estruturas e furos lineares e muitas vezes com a necessidade de incertos de fechamento dos furos (tampões). Em manufatura subtrativa não é possível construir canais que acompanhem o formato das cavidades dos moldes mecânicos favorecer a troca de calor. Dada a necessidade dos tampões, quase sempre ocorrem áreas com turbulência do fluido refrigerante, o que além de reduzir a eficiência na troca de calor, produzem vibrações que podem causar falhas estruturais nos moldes mecânicos e nas peças fabricadas. Com o uso da MA, por sua forma de construção camada por camada, existe a possibilidade de fabricar moldes complexos com canais e circuitos de refrigeração que se adaptem melhor ao formato da cavidade que se deseja resfriar, chamados de canais de refrigeração conformados (TAMANINI; WILTGEN, 2021A; TAMANINI; WILTGEN, 2021B).

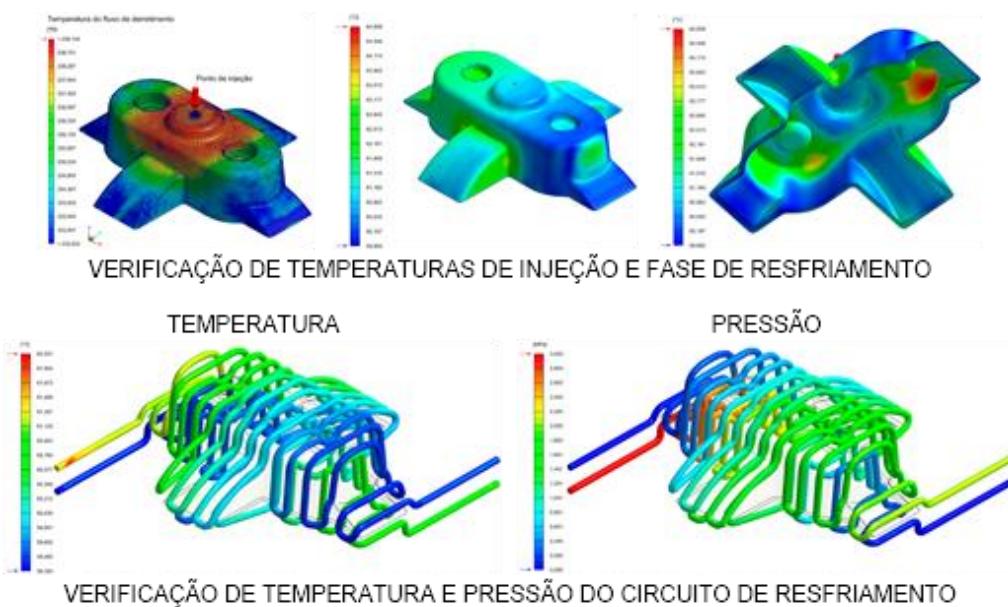
Existem basicamente duas formas de conectar canais de refrigeração, ou são conectados em série ou em paralelo. Os canais de refrigeração em

série estão conectados em um único circuito de entrada do fluido refrigerante até a saída, devido a praticidade de fabricação via manufatura subtrativa eram os mais utilizados (FENG; KAMAT; PEI, 2021, MARQUES *et al.*, 2013, 2014, 2015). Para os canais de refrigeração em paralelo, o fluido refrigerante flui através de todos os canais de forma independente podendo ser aplicado em moldes complexos evitando aquecimento excessivo do molde e deformação das peças.

Nas simulações computacionais de moldes mecânicos essas configurações são testadas a fim de verificar o comportamento térmico. Durante as análises das simulações podem ser verificadas as ocorrências de pressão excessiva na circulação do fluido refrigerante, ou falhas na refrigeração quando somente uma parte da peça é resfriada (FENG; KAMAT; PEI, 2021; MARQUES, 2013, 2014, 2015; PARK; DANG, 2017).

Na Figura 4 é possível observar a análise de uma simulação computacional, realizada com o programa de simulação *Moldex 3D R16*.

Figura 4 - Simulações de temperatura e pressão em molde mecânico
SIMULAÇÃO



Fonte: Adaptado de ALBA *et al.*, 2020.

Com este programa é possível simular a dinâmica do circuito de refrigeração ramificado mostrando sua eficiência em pressão e temperatura. As

entradas de fluido de refrigeração estão representadas pela cor azul (frio) e as saídas de fluido de refrigeração na cor vermelha (quente) devido ao aumento do gradiente de temperatura na troca de calor.

Observa-se que há uma melhor distribuição do calor na simulação utilizando canais de refrigeração em paralelo (FU, 2015). Adequações no projeto com base nas informações das análises obtidas de simulações computacionais permitem a construção de um protótipo físico real em MA, para a realização de testes e a comprovação dos resultados obtidos durante as simulações computacionais (WITGEN, 2019; SHINDE; ASHTANKAR, 2017; REIS; BARREIROS; VASCO, 2018).

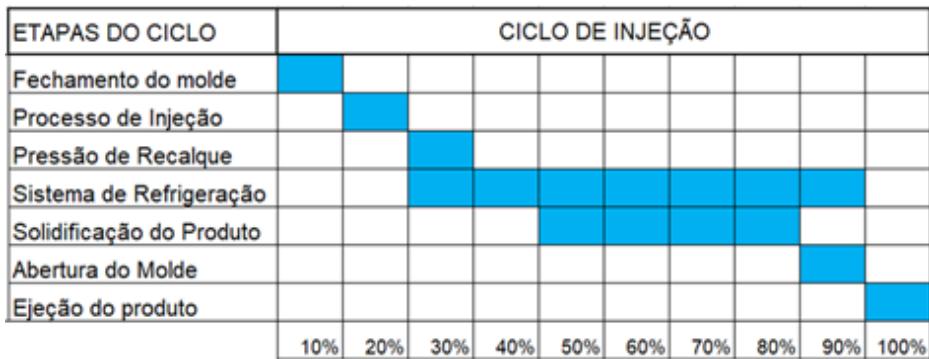
4 INFORMAÇÕES E ANÁLISES EXTRAÍDAS DAS SIMULAÇÕES

A simulação computacional auxilia na fase de projeto dos moldes mecânicos, que reduz significativamente o custo de uma modificação. O principal objetivo da análise é avaliar o desempenho térmico de acordo com os requisitos no processo de injeção de plástico. As simulações térmicas consideram a atuação do escoamento do refrigerante ao longo dos canais de refrigeração e a troca térmica com a peça durante a fase de resfriamento.

Na Figura 5, é possível verificar que o tempo de resfriamento de uma peça representa mais de dois terços do ciclo de fabricação em manufatura formativa.

Utilizar um sistema de refrigeração que possibilite resfriar a matriz de maneira uniforme e eficiente irá proporcionar um tempo menor do ciclo de fabricação aumentando a produtividade (ALBA *et al.*, 2020; HARADA, 2004; FENG; KAMAT; PEI, 2021; MARQUES; SOUZA; SANTOS, 2013; MARQUES *et al.*, 2015; PARK; DANG, 2017).

Figura 5 - Representação as etapas de um ciclo de injeção de plástico.



Fonte: Adaptada de MIRANDA, 2017.

As principais informações obtidas de uma simulação computacional são: tempo de preenchimento, pressão de injeção, empenamento, contração e temperatura. Entretanto, como esta pesquisa trata da eficiência do sistema de refrigeração, o foco das informações deve ser extraído da análise de simulação da refrigeração são:

- *Em circuitos em série observa-se que o circuito solicita maior pressão devido ao longo caminho que o refrigerante possui, gerado pela geometria complexa diferente do que ocorre com circuitos em paralelo (FENG; KAMAT; PEI, 2021).*
- *O número de Reynolds determina o tipo de regime do fluxo refrigerante. Para atingir um fluxo turbulento (4.000 ou superior) no sistema refrigerante, tornando melhor a troca térmica na peça fabricada (MARQUES et al., 2015).*
- *O refrigerante com uma temperatura mais baixa acarreta melhor transferência de calor e menos defeitos nas peças, enquanto uma menor taxa de fluxo do refrigerante aumenta a temperatura na saída do refrigerante. A temperatura do refrigerante tem relação com a vazão e pressão aplicada no circuito, sendo que a temperatura do refrigerante varia ao longo do circuito, porém não deve variar mais de ~3°C podendo comprometer a qualidade na fabricação (FENG; KAMAT; PEI, 2021; RAZ; ZAHALKA, 2016; WANG; YU; WANG, 2015).*
- *O preenchimento da peça é determinado pelo fluxo do material fundido que é determinado principalmente por sua viscosidade, e quanto mais o*

material fundido é resfriado, mais ele tende a ser viscoso e se solidificar, portanto, existe um compromisso entre o resfriamento da peça após o preenchimento completo (FENG; KAMAT; PEI, 2021).

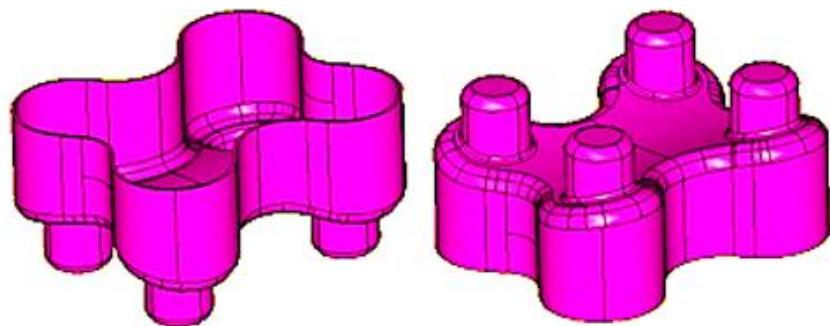
Durante o processo de produção, a temperatura do molde é estabilizada em um valor que deve ser homogêneo em toda matriz. Este valor está relacionado com a temperatura do material fundido e os parâmetros do refrigerante (BARETA, 2007; CORDOVA, 2018; RAZ; ZAHALKA, 2016).

5 ESTUDO DE CASO PARA SIMULAÇÃO DE PEÇAS COMPLEXAS

O estudo de caso realizado nesta pesquisa trata da extração de informações de uma análise de simulação computacional de injeção em um molde mecânico complexo e que só pode ser construído via manufatura aditiva. A análise está limitada a transferência de calor entre o canal de refrigeração e a peça a ser fabricada que é o principal fator responsável pela produtividade. A peça em questão é apresentada na Figura 6 será utilizada na simulação computacional do estudo de caso. Esta peça possui um volume de injeção de 580 cm³, espessura constante de 3 mm e altas especificações geométricas (cavidade profunda, detalhes delgados e rebaixos internos) no qual um sistema de refrigeração convencional apresenta baixa eficiência (resfriamento não homogêneo) (ALBA *et al.*, 2020; COLMENERO *et al.*, 2021).

A estratégia adotada para demonstrar o impacto positivo da simulação de injeção é realizar a análise de diferentes circuitos de refrigeração fabricados via manufatura subtrativa (linear) e manufatura aditiva (conformado) para demonstrar as vantagens em adotar o uso de manufatura aditiva na construção do molde. Nesta pesquisa foram executadas as simulações com o aplicativo computacional *Moldex3D R16*, e a modelagem tridimensional do modelo, assim como, dos projetos de circuitos de refrigeração foram desenvolvidas em um programa de CAD, ambos em um computador de 64-bit, *Intel Core i-77700HQ* de 2,8 GHz.

Figura 6 - Peça complexa projetada para o estudo de caso de simulação.

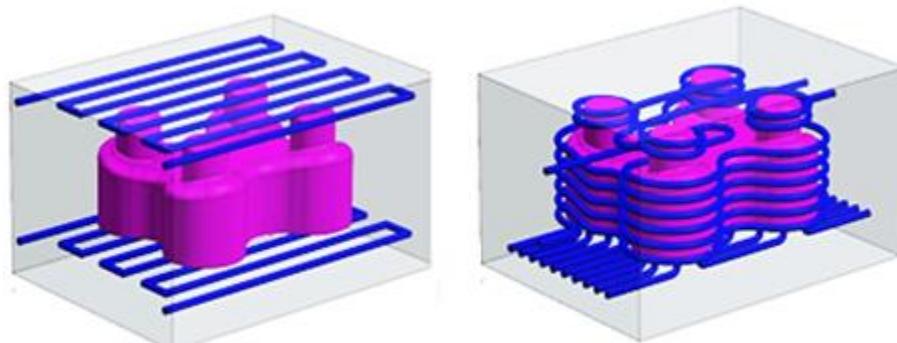


Fonte: Próprios Autores.

Neste estudo foi considerada uma análise de matrizes construídas em manufatura aditiva e manufatura subtrativa sendo que a matéria-prima para matrizes em manufatura aditiva é de metal 316L, e a de manufatura subtrativa é de metal P20. As matrizes montadas nos moldes mecânicos possuem a dimensão de 400 mm(C) x 340 mm(L) x 250 mm(H) com uma única cavidade e canais de refrigeração de 8 mm de diâmetro.

Na Figura 7 tem-se os tipos de canais de refrigeração do estudo de caso.

Figura 7 - Tipos de canais de refrigeração nas simulações de estudo de caso.



(A) - Canais de refrigeração Lineares (B) - Canais de refrigeração Conformados

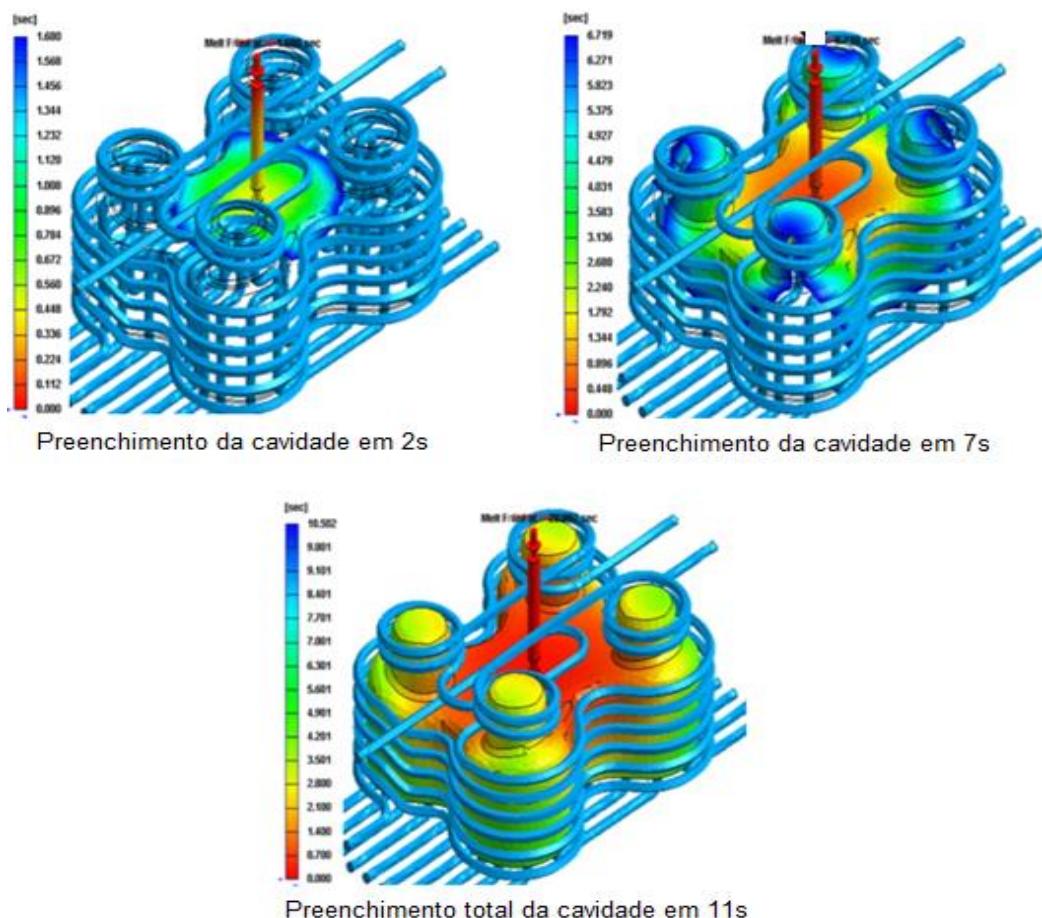
Fonte: Próprios Autores.

Para os canais de refrigeração lineares (Figura 7A) que são fabricados via manufatura subtrativa possuem volume de ~530 cm³. Para os canais de refrigeração conformados (Figura 7B), sendo que na matriz inferior foi adotado

canais conformados em paralelo, e a matriz superior com canais de refrigeração em série o volume total é de ~1.180 cm³. O refrigerante utilizado é água pura e uma entrada com temperatura de ~75 °C e vazão de entrada de 8 litros/minuto.

A injeção será posicionada no baricentro da geometria da peça para que o preenchimento da cavidade fique o mais uniforme possível. Na Figura 8 é possível observar como o preenchimento do molde ocorre de maneira uniforme em 11s. Durante o preenchimento da cavidade a temperatura inicial do polímero fundido é de ~230 °C que vai diminuindo em função da troca de calor.

Figura 8 - Simulação do preenchimento da cavidade do molde simulado.

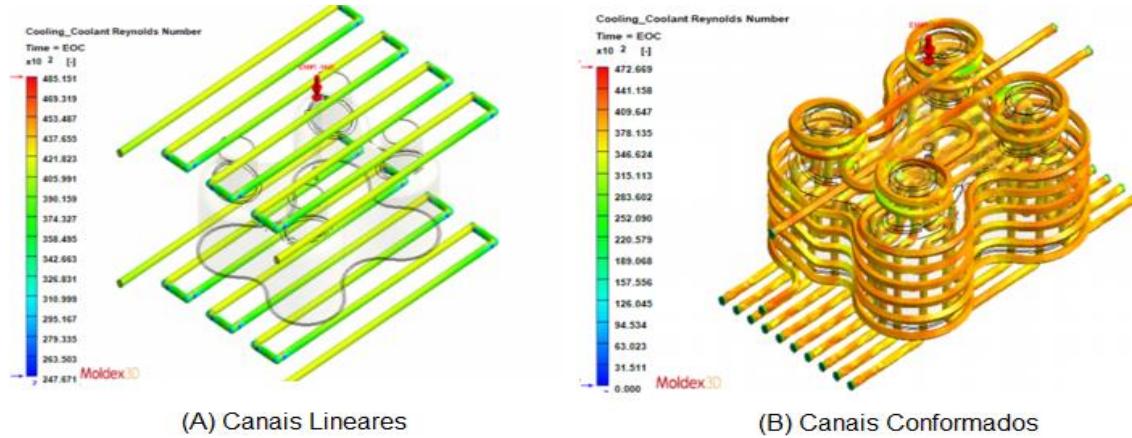


Fonte: Próprios Autores.

Durante as simulações avalia-se a eficiência da troca de calor do líquido refrigerante, sendo que os dados de entrada são: a geometria dos canais, o tipo do líquido refrigerante utilizado e vazão. Como resposta da análise é obtida o número de Reynolds (Figura 9), sendo que o fluxo do refrigerante deve ser

em regime turbulento para melhor troca de calor (entre ~4.000 e ~10.000). Ambos os canais apresentaram eficiência na troca de calor.

Figura 9 - Simulação do fluxo do refrigerante em regime turbulento.

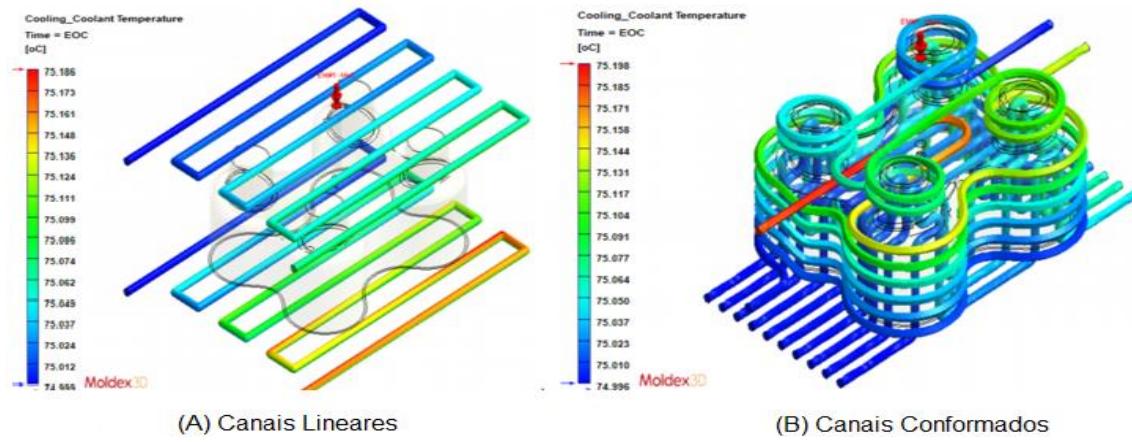


Fonte: Próprios Autores.

Durante a refrigeração ocorre a circulação do refrigerante internamente nos canais para a troca de calor das matrizes dos moldes mecânicos. Na simulação apresentada na Figura 10 é possível observar a variação da temperatura no percurso entre a entrada e saída do refrigerante. A temperatura de entrada e saída do refrigerante não deve ter uma diferença superior a ~5 °C, caso isso não venha a ocorrer a temperatura do molde se elevará o que pode comprometer a qualidade da peça produzida (MARQUES *et al.*, 2015; SHAYFULL *et al.*, 2013).

Ambos os canais estão de acordo com o limite especificado. É importante observar que os circuitos com canais conformados fabricados via manufatura aditiva apresentam variações maiores de temperatura devido à maior transferência de calor e pela maior proximidade com a cavidade molde, em relação com o circuito convencional fabricado com manufatura subtrativa. A variação de temperatura nos circuitos em série (localizado na matriz superior) ocorreu de forma linear e a temperatura no canal de saída é superior à temperatura ao longo do circuito, o mesmo não acontece em um circuito em paralelo (localizado na matriz inferior), no qual a variação de temperatura é menor devido ao menor percurso do circuito (RAZ, ZAHALKA, 2016; WANG, YU, WANG, 2015).

Figura 10 - Simulação da variação das temperaturas (°C) ao longo do circuito de canais de refrigeração.

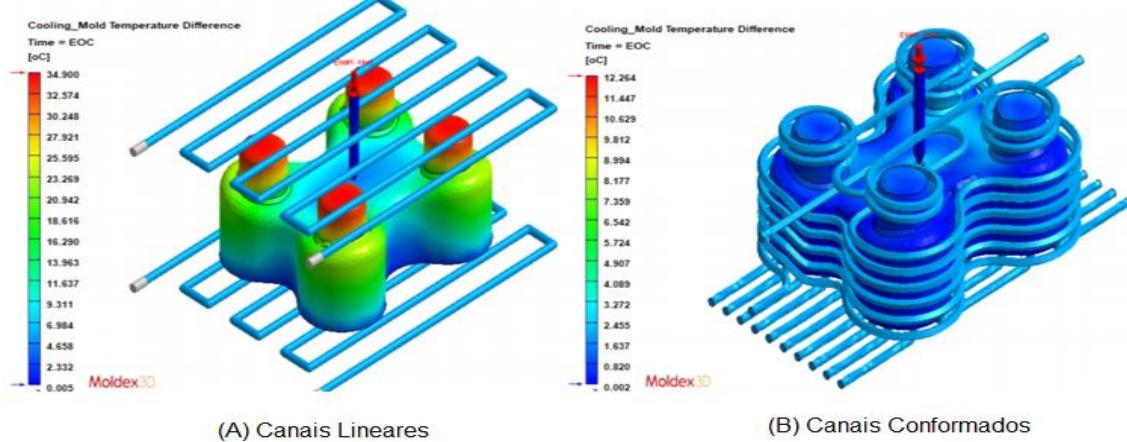


Fonte: Próprios Autores.

No final da fase de preenchimento (Figura 11), a temperatura da peça é a resultante da temperatura total das matrizes do molde mecânico considerando a eficiência do resfriamento e o aquecimento do material fundido durante o ciclo de injeção. Isso é relevante para a análise, pois através do mapa de temperatura das faces das matrizes é possível avaliar se as temperaturas estão uniformes.

Os canais de refrigeração devem ser capazes de manter a temperatura dentro do requisito de cada tipo de matéria-prima utilizado para a fabricação da peça. Se as análises das simulações mostrarem regiões com temperatura não homogêneas, isso significa que a troca de calor não está adequada. Observa-se nas simulações deste estudo de caso que a matriz que possui a temperatura mais homogênea é a que de canais conformados fabricados via manufatura aditiva (Figura 11B).

Figura 11 - Simulação da temperatura média ($^{\circ}\text{C}$) na superfície do molde durante a injeção.



Fonte: Próprios Autores.

A simulação da peça com canais lineares (Figura 11A) possui concentração de calor nas regiões das torres e isso causa problema geométrico devido ao empenamento, e tensões na peça devido ao resfriamento e contração em momentos diferentes, o que leva a conclusão de que esse tipo de sistema de refrigeração não é adequado para peças complexas.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As informações obtidas das análises das simulações computacionais realizadas com o modelo de peça do estudo de caso, com a utilização dos circuitos de refrigeração do tipo linear e do tipo conformado são discutidas nesse tópico para a avaliação do desempenho dos tipos de manufatura para compreender o mais adequado para a construção de moldes mecânicos aplicados a manufatura formativa.

As simulações realizadas mostram que não houve região do molde em que o polímero fundido apresentou dificuldade de escoamento que provocaria descontinuidade no preenchimento do molde e consequentemente peças incompletas.

Neste estudo de caso, a temperatura de ejeção da peça foi de $\sim 92^{\circ}\text{C}$, o circuito de refrigeração linear demora cerca de $\sim 30\text{s}$, e o circuito de refrigeração conformado demora cerca de $\sim 22\text{s}$ para atingir a temperatura de

ejeção, ou seja, o tempo de resfriamento do circuito conformado é ~27% menor em relação ao circuito linear, permitindo a extração mais rápida da peça fabricada em MA.

As simulações mostram que a variação de temperatura em diferentes regiões da peça com o circuito de refrigeração conformado em serie e paralelo é de ~3°C (Figura 11B), enquanto o circuito de refrigeração linear apresenta variação de temperatura de ~30°C (Figura 11A), cerca de 10 vezes maior quando comparado ao circuito de refrigeração conformado (KHAN *et al.*, 2014). A temperatura de entrada e saída do fluido refrigerante não deve ter uma diferença menor que ~5°C para não comprometer a qualidade da peça produzida (MARQUES *et al.*, 2015; SHAYFULL *et al.*, 2013).

7 CONCLUSÃO

Baseado nos resultados pode-se concluir que circuitos de refrigeração conformados são mais eficientes entre os circuitos de refrigeração lineares, o que era esperado. A construção via MA proporciona uma temperatura mais homogênea na fabricação da peça, menor tempo para atingir a temperatura de extração da peça do molde, menor contração volumétrica, entre outros. Assim sendo, terá melhor qualidade e redução do tempo de ciclo de fabricação.

Devido as inúmeras configurações de circuitos de refrigeração que podem ser projetados e aplicados em um molde mecânico de injeção, as opções inseridas nesta pesquisa tratam de alguns exemplos possíveis em simulações computacionais. Em um processo produtivo em escala o tempo de ciclo de manufatura da peça e a eficiência de refrigeração do molde são relevantes, pois, a qualidade da peça e a produtividade dependem disso. Conforme apresentado nesta pesquisa, o tempo de ciclo pode ser reduzido através de uma troca de calor eficiente entre o circuito de refrigeração e a peça, reduzindo o tempo de resfriamento de maneira homogênea da peça no qual a inserção de canais de refrigeração conformados nos moldes é uma oportunidade para suprir esta necessidade.

A simulação computacional de injeção contribui para projetar o molde com maior eficácia reduzindo significativamente o tempo e custo na fabricação

de moldes e de peças. O ciclo total de produção de cada peça é composto pelas fases de preenchimento da cavidade do molde mecânico com o material fundido, pressão de recalque, resfriamento da peça e abertura do molde. O molde convencional (canais de refrigeração lineares) o tempo de ciclo foi de ~61s, e para o molde em MA (canais de refrigeração conformados) foi de ~53 s, isso significa um aumento de produtividade do molde em ~15,5%.

O projeto de circuito de refrigeração do tipo conformado (série ou paralelo) quando comparado com canais de refrigeração lineares utilizados nesse estudo de caso, beneficia a troca térmica entre a peça plástica e o fluxo de refrigerante que atravessa os canais de refrigeração conformados em matrizes produzidas via MA, e resfriam todas as zonas reduzindo problemas de qualidade da peça, evitando empenamento e tensão residual, reduzindo o tempo de ciclo de fabricação. Estas observações são possíveis somente com o estudo de caso e a análise da informação vinda das simulações computacionais, isso evidencia que as tecnologias de simulação quando aplicadas em moldes mecânicos fabricados via MA se mostram um caminho interessante de investigação científica a ser melhor entendido e explorado. Isso permitirá maior eficiência na fabricação em manufatura formativa e beneficiar sua utilização na indústria em um futuro próximo.

REFERÊNCIAS

ABIPLAST (Associação Brasileira do Plástico), **Perfil 2018 - Indústria Brasileira de Transformação e Reciclagem de Material Plástico**. São Paulo, 2018. 47p.

ALBA, A. T.; COLMENERO, J. M. M, PERETE D. D.; DOÑATE C. M. A New Conformal Cooling Design Procedure for Injection Molding Based on Temperature Clusters and Multidimensional Discrete Models. **MDPI Polymers**, v.12, p.1-35, 2020.

ALCALDE, E.; WILTGEN, F. Estudo das Tecnologias em Prototipagem Rápida: Passado, Presente e Futuro. **Revista de Ciências Exatas Universidade de Taubaté**. v.24(02), p.12-20, 2018.

ASNAFI, N.; RAJALAMPI, J.; ASPENBERG, D.; ALVEFLO, A. Production Tools Made by Additive Manufacturing Through Laser-based Powder Bed Fusion. **Berg Huettenmaenn Monatsh**. v.165(03). p.125-136, 2020.

BARETA, D. R. **Estudo Comparativo e Experimental de Materiais Aplicados a Insertos Machos de Moldes de Injeção Dentro do Conceito de Molde Híbrido.** Dissertação (Mestrado), Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2007. 158p.

BROTAN V.; BERG O. A.; SORBY K. Additive manufacturing for enhanced performance of molds. 6th CLF - 6th CIRP Conference on Learning Factories. Trondheim, 29-30 June, p.186-190, 2016.

CHUNG, C. Y. Integrated Optimum Layout of Conformal Cooling Channels and Optimal Injection Molding Process Parameters for Optical Lenses. **Applied Sciences.** v.9(20), p.1-17, 2019.

COLMENERO, J. M. M.; ALBA, A. T.; REQUENA, J. C.; DOÑATE, C. M. A New Conformal Cooling System for Plastic Collimators Based on the Use of Complex Geometries and Optimization of Temperature Profiles. **MDPI Polymers.** v.13(2744), p.1-27, 2021.

CORDOVA B.A.B. **Otimização do processo de moldagem por injeção do ABS via métodos estatísticos.** Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa, 2018. 186p.

DE BLASIO, C.A. **Solução de Defeitos na Moldagem por Injeção de Termoplásticos.** Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007. 174p.

DIMLA, E.; TRINIDAD, J.R.; GRANADA, A. A. G.; REYES G. Thermal Comparison of Conventional and Conformal Cooling Channel Designs for a Non-Constant Thickness Screw Cap. **J. The Korean Society for Precision Engineering.** v.35(01), p.95-10, 2018.

DOMINGUES, L. C. F. **Análise Comparativa do Uso de Tecnologias de Fabrico Rápido no Processo Produtivo de Elementos Moldantes para Moldes de Injeção de Plásticos.** Dissertação (Mestrado), Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Leira, 2015. 133p.

FENG, S.; KAMAT, A. M.; PEI, Y. T. Design and Fabrication of Conformal Cooling Channels in Molds: Review and Progress Updates. **International Journal of Heat and Mass Transfer,** v.171 (121082), p.1-29, 2021.

GOMES, J.; WILTGEN, F. Avanços na Manufatura Aditiva em Metais: Técnicas, Materiais e Máquinas. **Revista Tecnologia,** v.41(01), p.1-16, 2020.

GRIES, S.; MEYER, G.; WONISCH, A.; JAKOBI, R.; MITTELSTEDT, C. Towards Enhancing the Potential of Injection Molding Tools Through Optimized Close-Contour Cooling and Additive Manufacturing. **MDPI Materials.** v.14(3434), p.1-18. 2021.

HARADA, J. **Moldes para Injeção de Termoplásticos: Projetos e Princípios Básicos.** Artliber, 2004. 308p.

HARADA, J.; UEKI, M. M. **Injeção de Termoplásticos: Produtividade com Qualidade.** Artliber, 2012. 268p.

HATOS I.; B KOCSIS B.; HARGITAI H. Conformal Cooling with Heat-Conducting Inserts by Direct Metal Laser Sintering. **XXIII International Conference on Manufacturing.** Hungary, 7- 8 June, p.1-8. 2018.

JUNIOR, G. B. M; COSTA, C.A. Manufatura Aditiva Aplicada na Fabricação de Insertos para Moldes de Injeção Termoplásticos. **Scientia Cum Industrial,** v.7(02), p.76-82, 2019.

KELLENS K.; MERTENSN R.; PARASKEVAS D.; DEWULF W.; DUFLOU J. R. Environmental Impact of Additive Manufacturing Processes: Does AM Contribute to a More Sustainable Way of Part Manufacturing? **The 24th CIRP Conference on Life Cycle Engineering.** Leuven, March 8th to 10th, p.582-587, 2017.

LOPES, M.; WILTGEN, F. Manufatura Aditiva em Moldes Mecânicos. **IX Congresso Internacional de Ciência e Tecnologia (CICTED 2020).** Taubaté, 21-23 outubro, p.1-14, 2020.

LOPES, M.; WILTGEN, F. Manufatura Aditivava na Indústria Automotiva Voltada para Sistemas de Segurança Veicular. **XLI ENEGEP Encontro Nacional de Engenharia de Produção,** Foz do Iguaçu, 18-21 outubro, p.1-16, 2021A.

LOPES, M.; WILTGEN, F. Manufatura Aditiva na Indústria Automotiva de Segurança Veicular. **X Congresso Internacional de Ciência e Tecnologia e Desenvolvimento (CICTED 2021).** Taubate, 05-07 outubro, p.1-19, 2021B.

MARTINHO, P. M. G. **Mechanical Design of hybrid Moulds - Mechanical and Thermal Performance Implications.** Tese (Doutorado), Universidade de Minho. Braga, 2010. 448p.

MARQUES, S.; SOUZA, A. F.; SANTOS, R. F. F. Efeito do Conformal Cooling em um Molde de Injeção de Plástico por Simulação de Transferência de Calor. **2º Seminário de Tecnologia, Inovação e Sustentabilidade.** p.1-17. Joinville. 27-29 novembro, 2013.

MARQUES, S.; SOUZA, A. F.; MIRANDA, J.; SANTOS, R.F.F. Evaluating the Conformal Cooling System in Molds for Plastic Injection by CAE Simulation. **9º International Conference on Industrial Tools and Material Processing Technologies.** Slovenia, 05-11 April, p.1-7. 2014.

MARQUES, S.; SOUZA, A. F.; MIRANDA, J.; YADROITSAU, I. Design of Conformal Cooling for Plastic Injection Molding by Heat Transfer Simulation. **Polímeros**. v.25(6), p.564-574, 2015.

MIRANDA, D. A. **Estudo Experimental e de Simulação Computacional Para Análise e Melhoria da Eficiência de um Molde de Injeção de Termoplásticos**. Dissertação (Mestrado), Universidade da Região de Joinville, Joinville, 2017. 115p.

RAZ, K., ZAHALKA M. Analysis of Temperature Influence on Injection Molding Process. **Proceedings in Manufacturing Systems**. v.11(02), p.95-100, 2016.

SILVA, S. L. **Sistemática para o Projeto do Sistema de Refrigeração de Moldes para Injeção de Polímeros**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009. 150p.

SHINDE, M. S.; ASHTANKA, K. M. Additive Manufacturing-Assisted Conformal Cooling Channels in Mold Manufacturing Processes. **Advances in Mechanical Engineering**. v.9(5) p.1-14, 2017.

SINGH, L.; ARORA, N. Design and Manufacturing Injection Mould Conformal Cooling Channels Using Additive Manufacturing: A Review. **International Journal of Mechanical and Prod. Engineering**. v.7(03), p.2321-2071, 2019.

SOUZA, A. F., MARQUES, S. Análise da Influência do Conformal Cooling em Molde de Injeção de Plástico. **Tecnologias para Competitividade Industrial**, v.7(02), p.69-81, 2014.

SOUZA, A. F.; MARIN, F.; FONTANELLA, L.; KÄSEMODEL, R. B.; MIRANDA, J. Molde Híbrido com Canais Complexos de Refrigeração Fabricado por Manufatura Aditiva Metálica (SLM) e Usinagem. Projeto de Pesquisa em Desenvolvimento No Brasil. **Ferramental**. v.76, p.40-43, 2018.

TAMANINI, C.; WILTGEN, F. Moldes com Múltiplos Canais de Refrigeração Via Manufatura Aditiva. **Workshop da UFABC em Engenharia Mecânica**. São Bernardo do Campo, 27-29 setembro, p.1-14, 2021A.

TAMANINI, C.; WILTGEN, F. Fabricação de Moldes Mecânicos Via Manufatura Aditiva. **X Congresso Internacional de Ciência e Tecnologia (CICTED 2021)**. Taubaté, 20-22 outubro, p.1-20, 2021B.

TUTESKI O.; KOČOV A. Mold Design and Production by Using Additive Manufacturing (AM) - Present Status and Future Perspectives. **INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL "INDUSTRY 4.0"**. Skopje, 18 August, p.1-5, 2018.

VASCONCELOS, P. V. **Fabrico Rápido Indireto de ferramentas Compósitas a partir de Modelos de Prototipagem Rápida.** Tese (Doutorado), Universidade do Porto. Porto, 2014. 415p.

VIETEN, T.; STAHL, D. SCHILLING, P., CIVELEK, F.; ZIMMERMANN, A. Feasibility Study of Soft Tooling Inserts for Injection Molding with Integrated Automated Slides. **Micromachines – MDPI.** v.12(730), p.1-13, 2021.

VOJNOVÁ, E. The Benefits of a Conforming Cooling Systems the Molds in Injection Molding Process. **International Conference on Manufacturing Engineering and Materials, ICMEM.** Slovakia, 6-10 June, p.535-543, 2016.

PARK, H. S.; DANG, X. P. Development of a Smart Plastic Injection Mold with Conformal Cooling Channels. **45th SME North American Manufacturing Research Conference NAMRC.** Los Angeles, 4-8 June, v.45, p.48-59, 2017.

REIS, N.; BARREIROS, F. M.; VASCO, J.C. Conformal Cooling by SLM to Improve Injection Moulding. **Conference Polymers and Moulds Innovations,** Portugal, 22 September, p.1-7, 2018.

SHAYFULL, Z.; SHARIF, S.; ZAIN, A. M.; SAAD, R. M.; FAIRUZ, M. A. Milled Groove Square Shape Conformal Cooling Channels in Injection Molding Process. **Materials and Manufacturing Processes.** v.28, p.884-889, 2013.

WANG, Y.; YU, K. M.; WANG, C. C. L. Spiral and Conformal Cooling in Plastic Injection Moulding. **Computer-Aided Design.** v.63, p.1-11 2015.

WILTGEN, F. Protótipos e Prototipagem Rápida sua Importância no Auxílio do Desenvolvimento Científico e Tecnológico. **10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação,** UFSCar, São Carlos, 5 a 7 agosto, p.1-4. 2019.

WILTGEN, F. Técnica de Ensaios de Sistemas Complexos com Metodologia de Engenharia de Sistemas & Requisitos. **Interfaces Científicas - Exatas e Tecnológicas,** v.4(01), p.51-60, 2020.

WILTGEN, F. Manufatura Aditiva em Metais - Leve, Forte e Inovador. **Revista Engenharia e Tecnologia.** v.13(02), p.1-12, 2021A.

WILTGEN, F. Testing Plan in Systems & Requirements Engineering for Strategic Engineering Areas. **26th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM).** Curitiba, 22-26 November, p.1-8, 2021B.

Enviado em: 16 dez. 2021.

Aceito em: 05 jul. 2022.

Editora responsável: Ágatha Borges Teixeira.