

MANUFATURA ADITIVA E SUBTRATIVA NA CONSTRUÇÃO DE MOLDES MECÂNICOS HÍBRIDOS PARA APLICAÇÃO EM MANUFATURA FORMATIVA

Filipe Wiltgen¹; Marcelo Lopes²

Resumo

Este artigo apresenta a pesquisa realizada na aplicação em conjunto da manufatura aditiva com a manufatura subtrativa para a construção de moldes mecânicos híbridos de injeção plástica para aplicação em manufatura formativa. A pesquisa apresenta a análise da aplicação de resinas de alta resistência para a utilização na produção de um molde mecânico híbrido e os resultados obtidos com este processo. Nesta pesquisa foram testadas duas peças diferentes (forma geométrica, tamanho e função) utilizando os moldes mecânicos híbridos. Os resultados promissores são apresentados e discutidos no decorrer deste artigo. A fusão das manufaturas permite especular que a sua utilização vai de encontro com as melhorias de custo e prazo de fabricação. A atual competitividade na indústria automobilística mundial tem estimulado o desenvolvimento e a aplicação de novas técnicas as quais estão em consolidação e adaptação na indústria o que permite a pesquisa científica aplicada ser inovadora neste seguimento. A perspectiva para a fusão das manufaturas em outras aplicações e seu amadurecimento em técnicas, máquinas e materiais, vai permitir muitos avanços na indústria no futuro próximo.

Palavras-chave: Manufatura aditiva; manufatura subtrativa; manufatura formativa; moldes mecânicos; protótipos.

Abstract

This paper presents research carried out in joint application of additive and subtractive manufacturing for construction of hybrid plastic injection molds for application in formative manufacturing. The research presents analysis of application in high resistance resins for use in production of a hybrid mold and result obtained with this process. In this research, two different pieces (geometric shape, size and function) were tested using hybrid molds. The promising results are presented and discussed throughout this article. The fusion of manufactures, allows speculating that their use meets cost and manufacturing term improvements. The current competitiveness in global industry has stimulated development and application of new techniques which are still being consolidated and adapted in industry, which allows applied scientific research to be innovative in this segment. The prospects for fusion manufactures in other applications and maturing techniques, machines and materials, will allow for many advances in industry in near future.

Keywords: Additive manufacturing; subtractive manufacturing; formative manufacturing; mechanical molds; prototypes.

¹ Doutor em Dispositivos e Sistemas Eletrônicos (área de Fusão Termonuclear Controlada) pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica-ITA, escritor, pesquisador e professor do Programa de Mestrado em Engenharia, coordenador do Curso de Especialização em Energia Solar Fotovoltaica da Universidade de Taubaté-UNITAU e da Faculdade de Tecnologia-FATEC, câmpus Pindamonhangaba e Bauru. E-mail: FWBarbosa@gmail.com ou Filipe.Wiltgen@unitau.br.

² Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade de Taubaté (UNITAU). E-mail: marcelolopes5x@gmail.com.

1 Introdução

Na indústria há sempre a necessidade de inovar e desenvolver itens novos e muitas vezes complexos, preferencialmente em menor tempo e custos possíveis. Na visão empresarial isso se traduz em propaganda e lucro tornando-se um grande diferencial competitivo industrial (BUAINAIN *et al.*, 2018; MARQUES *et al.*, 2015).

O crescimento industrial está intimamente correlacionado com a inovação e o desenvolvimento de novos produtos e processos (SENHORAS e TAKEUCHI, 2006). Essa pesquisa tem como objetivo unir a Manufatura Aditiva (MA) com a Manufatura Subtrativa (MS), e assim, aproveitar o melhor das duas técnicas no desenvolvimento de novos moldes mecânicos do tipo híbridos.

A nova técnica de MA atende a necessidade de desenvolvimento de novos produtos e reduz significativamente os prazos de fabricação e de aperfeiçoamento de projetos, diferentemente do processo tradicional que utiliza a MS utilizada para construir moldes mecânicos, no qual o custo e os prazos quase sempre são um problema competitivo (WILTGEN e GOMES, 2021).

A indústria automobilística devido aos estímulos financeiros subsidiados pelo governo federal tem proporcionado melhores desenvolvimentos científicos e tecnológicos no setor (LOPES e WILTGEN, 2021). É fato que o desenvolvimento de projetos em pesquisa aplicada é algo novo neste seguimento da indústria, no qual há uma enorme lacuna de conhecimento científico acadêmico. Isso interfere muito na evolução industrial nacional em relação a indústria internacional. O sucesso e o dinamismos obtido em processos no exterior é devido a uma grande aproximação com a pesquisa científica e acadêmica.

Ponto importante de atenção nessa pesquisa científica é a utilização da MA aplicada na construção de parte dos moldes mecânicos de injeção em plástico aliada à MS, e dessa forma, possibilitar maior agilidade na execução da fase de desenvolvimento de novos produtos, impactando diretamente na fabricação.

Essa pesquisa tem como objetivo realizar o estudo e a análise da engenharia de MA aplicada na construção de moldes mecânicos por injeção em plástico via a Manufatura Formativa (MF), ou seja, construindo protótipos utilizando a MA em conjunto com a MS, com o intuito de fabricar uma quantidade restrita de peças em MF para testes. Os testes com a fusão destas técnicas de manufatura permitem obter um novo processo de desenvolvimento de produto.

Essa pesquisa visa obter os parâmetros técnicos de análise que permitam investigar profundamente os impactos desta técnica no processo de produção utilizando os moldes mecânicos desenvolvidos com a MA e MS para a produção via MF.

A proposta da pesquisa utilizando os três tipos de manufaturas (MA, MS e MF) possui relevância científica para a evolução da engenharia de manufatura permitindo o grande aumento na flexibilidade construtiva e na redução do tempo de produção, tanto em pequena escala, quanto em larga escala industrial no futuro próximo.

2 Diferença entre os Tipos de Manufaturas

A indústria passou por uma grande evolução durante as últimas décadas, esta evolução é verificada principalmente nas novas metodologias aplicadas no processo produtivo, no desenvolvimento de novos materiais e novas técnicas, na utilização de novas tecnologias de manufatura o que culminou em novos e inovadores produtos.

Nessa pesquisa científica é dada ênfase nos processos de MA, MS e MF, ou seja, nas manufaturas existentes.

Na MS a peça é construída com a remoção de material. Nesse processo a peça é esculpida removendo o material para sua construção. A MS é conhecida por ter boa precisão geométrica e acabamento superficial, porém estes resultados dependem tanto da qualidade da máquina, quanto da experiência profissional do operador que utiliza a máquina.

A tecnologia mais recente é a MA que começou a se consolidar na década de 80 (ALCALDE; WILTGEN, 2018). A MA é um processo de fabricação que utiliza um desenho ou modelo em 3D feito digitalmente em *CAD* (*Computer Aided Design* – Desenho Assistido por Computador) no qual utiliza-se o modelo em 3D para compor a programação de fabricação no qual a matéria-prima é depositada camada por camada no eixo Z e a forma geométrica de cada camada nos eixos X e Y.

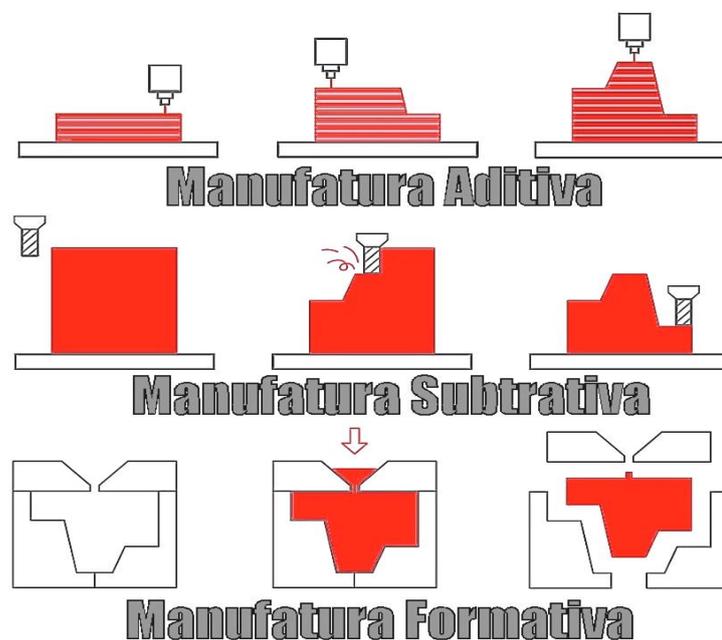
Inicialmente desenvolvida para a fabricação de protótipos físicos a MA tem evoluído em precisão e custo, assim como, nos tipos de materiais que são empregados na fabricação. A matéria-prima vai desde alimentos, plásticos e resinas até mesmo ligas metálicas nobres (WILTGEN, 2019; WILTGEN e ALCALDE, 2019; WILTGEN, 2021A; WILTGEN, 2021B). As principais vantagens em relação aos outros dois tipos de manufatura são devido ao fato de utilizar apenas a quantidade necessária de matéria-prima para a fabricação, e desta forma, não gera desperdício de materiais, não existem restrições geométricas e não necessitam de adoção de moldes (BARBOSA *et al.*, 2019).

A MF no processo de injeção de termoplástico é utilizada quase sempre para a produção em larga escala devido ao custo em diversos seguimentos industriais (MIRANDA, 2017).

Para conformar peças na forma que se desejada é necessário a utilização de um molde mecânico que por definição, diz-se que um molde é um modelo de uma cavidade com a geometria da peça no qual deve ser introduzido material na forma líquida ou semilíquida, que ao se solidificar fica com a mesma forma do molde mecânico (HARADA, 2004).

As principais diferenças nesses processos de fabricação podem ser observadas na Figura 1.

Figura 1 - Processos de manufaturas (Aditiva, Subtrativa e Formativa). Observar em vermelho o objeto construído.



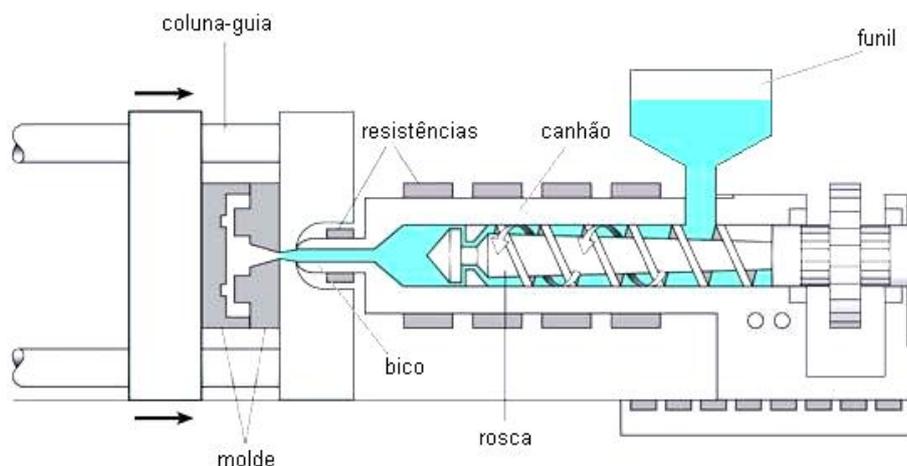
Fonte: Wiltgen (2019).

Os termoplásticos quando aquecidos se transformam no estado físico líquido (pastoso e viscoso) que possibilita o processo de conformação nas mais diversas formas geométricas. Ao resfriar voltam ao estado físico sólido podendo ser utilizado em diferentes tipos de montagens e peças. Esse processo pode ser reversível, diferente dos elementos de matéria-prima termofixos que não podem ser novamente conformados a partir de um aquecimento. Essa característica dos termoplásticos é importante para o processo de injeção via MF.

O processo de injeção consiste nas seguintes etapas: a matéria-prima (na cor azul), que se encontra na forma de grãos sólidos, é inserida na máquina injetora através do funil na qual é direcionada para o cilindro de plastificação que em seu interior possui uma rosca sem fim que conduz a matéria-prima no qual será aquecida via eletricidade.

Ao final do percurso, o polímero fundido (na cor azul) passa pelo bico injetor, penetra no molde e preenche a cavidade no interior do molde mecânico bipartido. É mantida uma pressão até que o polímero fundido seja resfriado e solidificado. Ao final desta etapa o molde mecânico se abre e a peça pronta e conformada é extraída e imediatamente se inicia um novo ciclo. Esse processo pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 - Processo de MF via injeção de termoplástico.



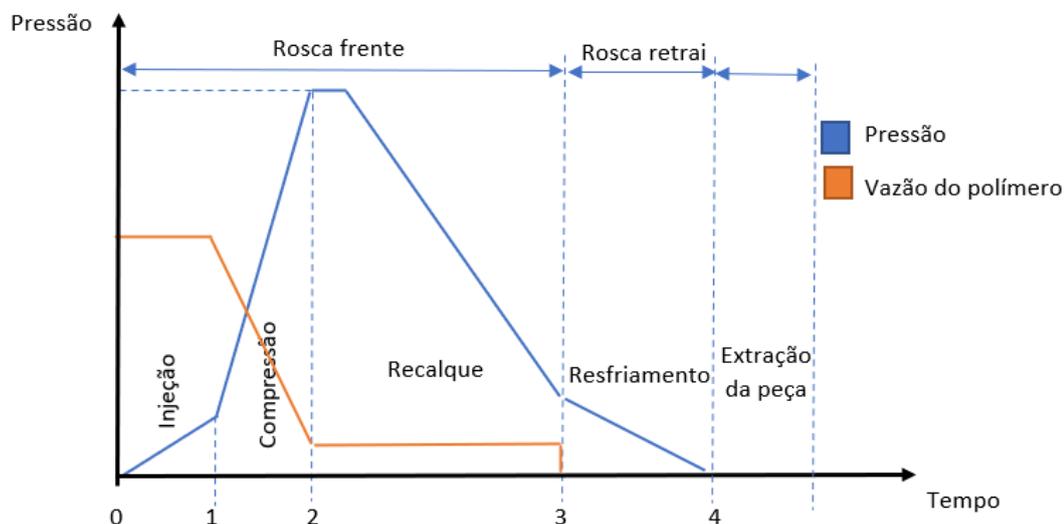
Fonte: Adaptada de LOPES e WILTGEN (2021).

Para cada peça produzida em MF, passa por um ciclo completo de fabricação no qual os parâmetros principais são a pressão de injeção e a temperatura do polímero fundido. Esses parâmetros devem ser bem controlados para que a qualidade da peça produzida no processo de MF esteja de acordo com os requisitos especificados.

Na Figura 3 pode ser observado o ciclo de produção em MF, assim com as principais fases do processo com a variação de pressão em função do tempo. Observa-se na Figura 3 que na fase inicial a rosca da injetora avança e transfere o material fundido (cor azul) para dentro da cavidade do molde mecânico até o preenchimento total da cavidade. Na sequência ocorre à fase de compressão no qual a pressão aumenta compactação da matéria-prima a fim de compensar à redução volumétrica da peça (contração do material). Em seguida o processo de recalque faz a compactação final garantindo a geometria correta da peça fabricada.

Na região em destaque (em vermelho), tem-se a fase mais crítica do processo para a resistência do molde mecânico híbrido, com o aumento da pressão e temperatura que ocorre na fase de compressão.

Figura 3 - Ciclo de manufatura formativa com suas principais fases do processo (pressão por tempo).



Fonte: Próprios Autores.

3 Moldes Mecânicos Híbridos Fabricados em Manufatura Aditiva e Subtrativa

Um molde mecânico do tipo híbrido recebe este nome quando em sua construção aplica-se dois ou mais processos distintos de manufatura, nesse caso de pesquisa as MA e a MS. A aplicação de manufaturas híbridas para a fabricação de moldes mecânicos é a parte central dessa pesquisa, porém, isso é apenas uma pequena fração das inúmeras possibilidades da junção de manufaturas (CORTINA *et al.*, 2018; WILTGEN, 2019).

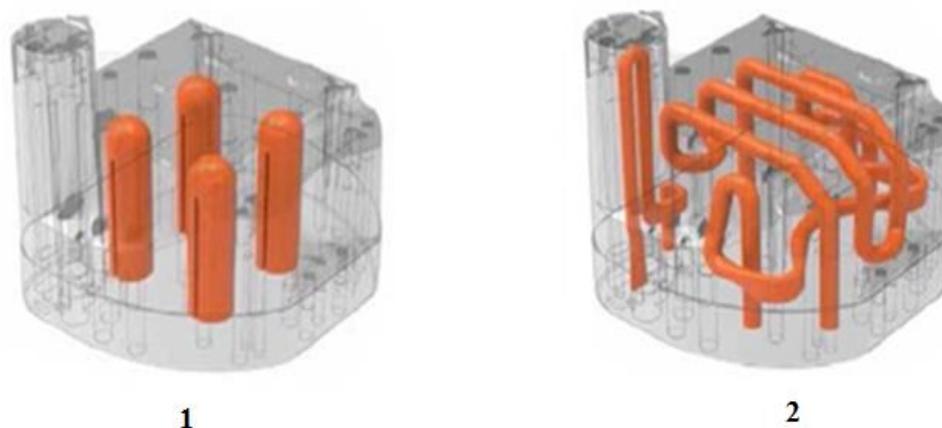
Considerando que a manufatura híbrida busca maximizar as vantagens dos diferentes processos, o molde mecânico híbrido é construído com diferentes propósitos. Um propósito é o aumento da produtividade em um processo de injeção plástica com MA.

Considerando que a maior parte do tempo de fabricação em injeção plástica está no processo de refrigeração do molde mecânico, é possível construir canais de resfriamento mais eficientes em MA, e isso reduz o ciclo de injeção de plástico, e conseqüentemente o aumento da produção (TAMANINI e WILTGEN, 2021; TAMANINI e WILTGEN, 2022; LOPES *et al.*, 2022; COSTA, 2019).

Canais de refrigeração de moldes mecânicos construídos via a MS são realizados baseados apenas em furos lineares, devido a limitações da construção geométrica em MS. Devido a isso, a refrigeração de moldes mecânicos em MS possui baixo rendimento na troca de calor e o resfriamento da peça ocorre de forma desigual. Esse problema pode ser evitado com a construção de canais de refrigeração via MA que não possui limitação de construção geométrica.

Um projeto de canais de refrigeração de moldes mecânicos mais eficientes e homogêneos faz muita diferença na fabricação da peça e consequentemente na produção das mesmas. Isso pode ser observado na Figura 4 com as diferenças entre canais de refrigeração (cor laranja) em MS (1) e MA (2). Os canais de refrigeração de moldes mecânicos devem ser geometricamente projetados para ficarem o mais próximo possível da forma geométrica da peça (cor cinza), obtendo desta forma um resfriamento eficiente do molde (LOPES *et al.*, 2022; ARORA, 2019; KOCHOV, 2018).

Figura 4 - Canais de resfriamento (cor laranja) construídos via manufatura subtrativa (1) e manufatura aditiva (2)



fonte: adaptado de Kochov (2018).

O bloco que suporta os moldes mecânicos deve ser construído em metal, portanto também pode vir a ser construído via a MA com a utilização de máquina de MA em metais (WILTGEN, 2021A; GOMES e WILTGEN, 2020).

Existe uma variedade de materiais metálicos disponíveis, a utilização da tecnologia no futuro próximo na construção de moldes mecânicos pode impactar muito na produtividade e na melhoria da qualidade da peça injetada (WILTGEN, 2021A; MARQUES *et al.*, 2015).

As cavidades moldantes dos moldes mecânicos híbridos nessa pesquisa foram construídas em resina de alta resistência com o uso de MA em máquinas de jateamento de material, o que proporciona melhor acabamento superficial e resistência mecânica adequada para a aplicação em questão (GRIFFIN, 2019).

4 Manufatura Aditiva no Processo de Construção em 3D e a Prototipagem

A prototipagem é uma técnica utilizada para acelerar o desenvolvimento de projetos, quase sempre é baseado na confecção de protótipos em material similar (de custo menor) ou o mesmo em materiais nobres no qual será desenvolvido o projeto real. Entretanto, quase sempre

o protótipo é fabricado em uma escala diferente (reduzida) do tamanho final de projeto (WILTGEN, 2019).

Um protótipo então é a denominação dada a uma peça que está em fase de desenvolvimento. No desenvolvimento são construídos muitos tipos de protótipos, até que o projeto seja concluído. Protótipos podem ser aplicados para estudos de forma, avaliação funcional, análise dos processos de fabricação, entre outros. Em análise de fabricação é fundamental utilizar protótipos, pois permitem uma avaliação adequada antes do processo de fabricação contínua definitiva. A utilização de tecnologia de prototipagem permite a agilidade necessária para garantir a inovação na indústria (WILTGEN, 2019).

Durante o processo de desenvolvimento de uma peça são gerados diversos protótipos, os quais são exaustivamente testados e aprimorados, até que finalmente atendam todos os requisitos impostos pelo projeto para que possam ser desenvolvidos como um novo produto (WILTGEN, 2020; WILTGEN, 2022).

O processo completo de prototipagem inclui diversas fases de desenvolvimento, os quais tem início com o projeto em *CAD*, com protótipos digitais em 3D, que passam por diversas avaliações e simulações computacionais, como interferências mecânicas funcionais e o estudo de cadeia de tolerâncias.

No desenvolvimento de *CAE (Computer Aided Engineering)* são realizadas análises de elementos finitos, testes digitais com carregamento das propriedades físicas e com as solicitações de cargas baseadas na especificação e aplicação do produto.

Logo que os resultados com o protótipo digital, inicia-se a construção de um protótipo físico real. Isso sempre é necessário devido a limitação de informação obtida por simulações computacionais em *CAD*.

As diversas variáveis ambientais são imprevisíveis e só podem ser medidas e confirmadas em uma peça física real. Com os protótipos construídos podem ser realizadas montagens e manuseios ergonômicos o que permite um sentimento físico dos elementos desenvolvidos (LOPES e WILTGEN, 2022).

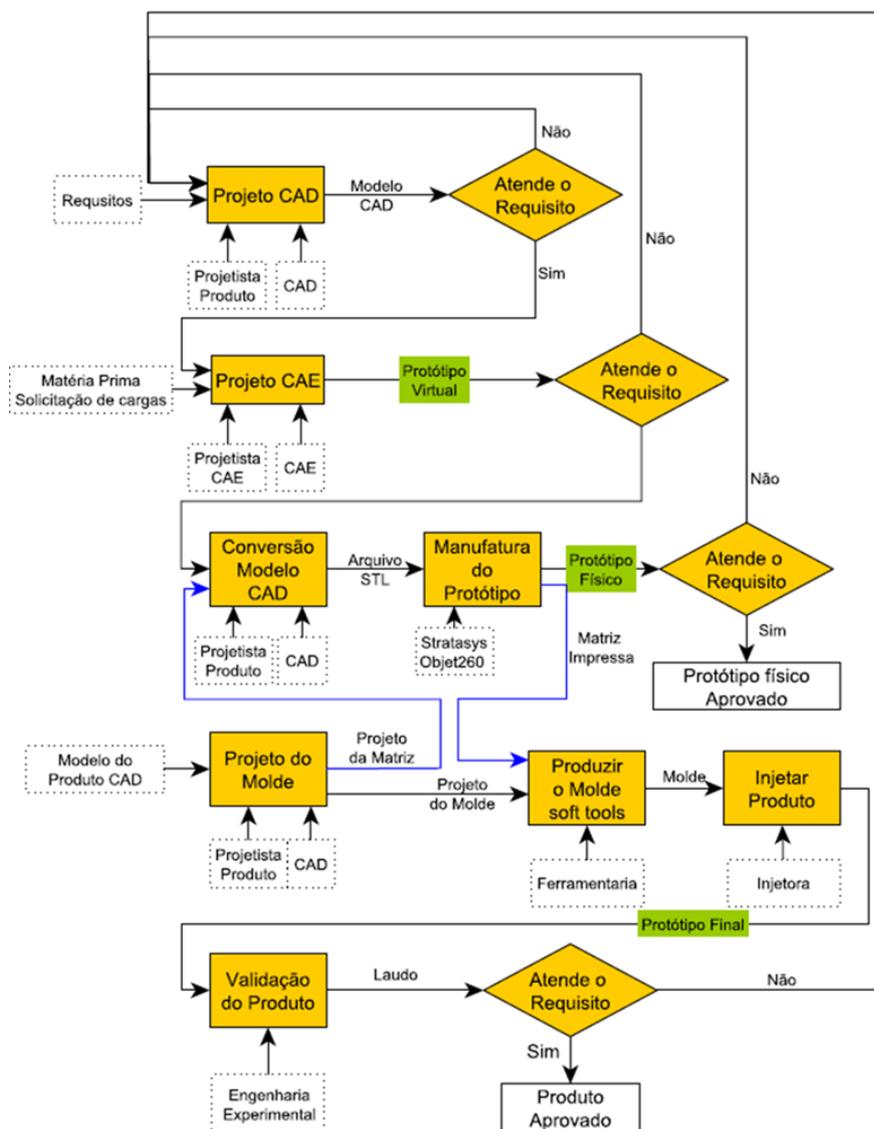
Porém, sempre existem alguns tipos de peças que devido a sua aplicação, e sua sequência de ensaios e testes (WILTGEN, 2020) será necessário a construção de pequenas quantidades (lotes) com suas características físicas de projeto (técnica de processo e tipos de matéria-prima), estes quase sempre são chamados de protótipos finais de ensaios e testes.

Isso se faz necessário para a realização de ensaios físicos (temperatura, humidade, pressão e ciclagem mecânica) que podem influenciar o desempenho da peça. Esses ensaios quando bem-sucedidos podem alavancar o nível de maturidade tecnológica (*TRL - Technology Readiness*

Level), permitindo que uma ideia se transforme em um projeto, e o projeto em um produto (WILTGEN, 2020; WILTGEN, 2022).

Na Figura 5, tem-se o fluxograma sintético do processo de desenvolvimento de uma peça baseado em um modelo digital em 3D para desenvolvimento e a fabricação de protótipos.

Figura 5 - Fluxograma sintético para o desenvolvimento de protótipos.



Fonte: Próprios Autores.

A evolução das tecnologias em MA vem proporcionando a construção de novas máquinas, com possibilidade de produzir peças com maior precisão e diferentes tipos de materiais (WILTGEN, 2019; ALCALDE e WILTGEN, 2018; GOMES e WILTGEN, 2020).

O processo de MA se caracteriza pela inclusão de materiais para a fabricação de peças, as quais segundo as normas técnicas existentes, dizem ser sete os tipos de técnicas que aplicam diferentes tecnologias na construção em 3D. Estas se diferenciam em função das características

dos processos, e dos tipos de matérias-primas empregadas na fabricação (GOMES e WILTGEN, 2020; SANTANA, 2019).

A tecnologia de MA mais relevante para essa pesquisa é a de jateamento de material que faz uso de matéria-prima líquida. Essa técnica consiste em uma cabeça de impressão que deposita gotas de matéria-prima no estado líquido preenchendo a área de uma camada movendo-se no plano *XY*.

A confecção de uma nova camada ocorre quando a cabeça de impressão se desloca na altura, ou seja, no eixo *Z* seguindo as informações do fatiamento da peça a ser fabricada. A solidificação da camada anteriormente depositada é realizada através da radiação de um feixe de luz ultravioleta. Logo que a luz ultravioleta ilumina a camada o material é solidificado em um processo de cura (cristalização).

Nessa técnica são utilizados dois tipos de materiais em estado líquido que quando são misturados permitem a construção da peça. Existe também, outro tipo de material menos nobre e solúvel em água destinado apenas para a fabricação de suportes removíveis e descartáveis.

Existe uma variedade de materiais disponíveis para fabricação de moldes de injeção impressos em 3D (CHEN, 2020): *PETG* (tereftalato de polietileno), *ABS* (acrilonitrila butadienoestireno), *NYLON* (conhecido como poliamida), *PP* (polipropileno) e *POM* (poliacetal).

A matéria-prima utilizada nessa pesquisa para a construção dos moldes híbridos foi o *RGD-515* e *RGD-531*. Essa matéria-prima após sua mistura e durante a sua fabricação possibilita construir camadas com espessuras de até ~30 μm (trinta micrometros), e após finalizada a construção a peça as propriedades físicas serão semelhantes à do polímero do tipo *ABS*.

5 Fabricação de Moldes Mecânicos Híbridos

A vida útil de molde mecânico fabricado via MA é determinado principalmente pela ação da temperatura e pressão impostos no processo de MF, e também, devido as características geométricas da própria peça a ser injetada (JÚNIOR, 2003; DE BLASIO, 2007; DRECHSLER *et al.*, 2016).

Dentre essas características geométricas importantes na fabricação de moldes mecânicos em MA, destacam-se:

- **Ângulo de Saída:** nome dado ao ângulo formado entre a face da cavidade da peça e o eixo de abertura do molde, existe restrição a geometria que possui ângulos reto. Esse esforço de extração pode danificar o molde em MA, quanto maior o ângulo de

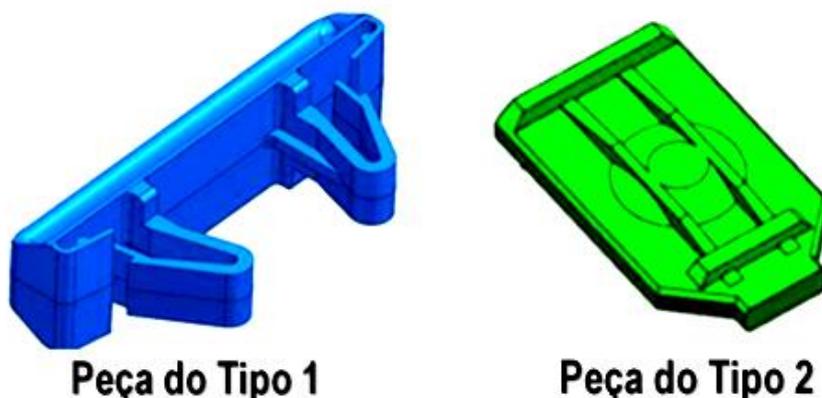
saída menor será a força de extração, recomendando-se um ângulo mínimo de $\sim 5^\circ$ para facilitar a extração das peças na cavidade do molde;

- ***Espessuras Constantes:*** *o desenho do produto deve possuir a espessura constante. Isso colabora para o preenchimento do plástico e diminui a perda de calor uniforme durante a injeção, evitando falhas de empenamento;*
- ***Eliminação ou Redução de Gavetas:*** *a necessidade de gavetas surge quando existe uma geometria que a extração é negativa, além de aumentar a complexidade do molde, pode dificultar a construção em MA, o uso de elementos móveis, as gavetas, podem causar rebarbas devido o atrito;*
- ***Ressaltos nos Moldes:*** *durante a injeção a cavidade do molde é submetida a pressão do polímero fundido, portanto se houver a necessidade de ressaltos, a relação de espessura com altura desse ressalto deve ter uma proporção mínima para resistir a deflexão ou ruptura por cisalhamento;*
- ***Sem Revestimentos:*** *A utilização de revestimentos com de nitreto de titânio para aumentar a resistência mecânica nos moldes produzidos com MA não são recomendadas devido ao aumento da temperatura no processo de injeção, o que compromete a durabilidade do molde mecânico e pode alterar a dimensão da peça.*

A matéria-prima a ser injetada tem influência direta na vida útil do molde mecânico, sendo que o índice de fluidez dos tipos de polímeros utilizados é a propriedade física que mais impacta na duração do molde. Quanto maior for seu valor, mais fácil é o preenchimento da cavidade do molde, exigindo assim uma menor pressão de injeção de plástico (DE BLASIO, 2007).

Nessa pesquisa foram produzidos dois tipos de peças, cuja geometria e matéria-prima são distintas. Na Figura 6 é possível observar os dois tipos distintos de peças.

Figura 6 - Ilustração dos tipos de peças fabricadas em plástico com moldes mecânicos híbridos.



Fonte: Próprios Autores.

A peça do tipo 1 (cor azul) foi produzida utilizando o polímero do tipo *POM* e a peça do tipo 2 (cor verde) foi produzida em poliéster do tipo elastômero.

O molde mecânico híbrido completo e montado pode ser visto em corte na Figura 7, no qual é possível notar as características e as partes que compõem todo o conjunto utilizado na fabricação de peças em MF via injeção em plástico. O porta molde utilizado nesse desenvolvimento é um item comercial, construído em aço *SAE 1045*, de fácil usinagem capaz de abrigar os moldes mecânicos fabricados em MA.

O canal de injeção de plástico que possui uma seção transversal com diâmetro entre ~5 a ~8mm, com o ponto de injeção em forma de leque e saídas de gás para facilitar o preenchimento da cavidade (NOGUEIRA e MIRANDA, 2017). Durante o processo de injeção o molde mecânico deve manter uma temperatura controlada, portanto a refrigeração do molde deve ser tal que mantenha uma troca de calor constante.

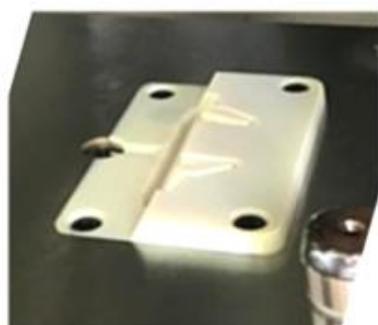
Considerando que este molde mecânico híbrido utilizado nessa pesquisa deve produzir uma quantidade reduzida de componentes para teste, o molde mecânico foi concebido de maneira que possa ser intercambiável possibilitando a utilização de um porta-molde para diferentes tipos de peças.

Para balancear a pressão de injeção do plástico durante o preenchimento das cavidades dos moldes mecânicos e garantir que o molde se mantenha fechado durante o processo é necessário manter uma pressão contrária todo o tempo de injeção garantindo o fechamento do molde.

Para suportar a pressão de injeção do plástico, os moldes mecânicos produzidos em MA são alojados em um bloco de aço produzido em MS, conforme pode ser visto na Figura 7. Assim sendo, as tensões não atuam diretamente sobre o molde em MA, e sim, na região do bloco de

aço evitando deformação prematura da linha de fechamento. Esta estratégia reduz a possibilidade de dilatação térmica do molde mecânico em MA devido à alta temperatura do plástico fundido durante a produção das peças.

Figura 7 – Moldes mecânicos em MA (cor branca) instalados no bloco de aço em MS.



Molde do Tipo 1



Molde do Tipo 2

Fonte: Próprios Autores.

Para melhorar a resistência mecânica e consequentemente aumentar a vida útil dos moldes mecânicos em MA é sempre importante observar o sentido de fabricação em MA que deve ser o mesmo sentido do fluxo de injeção de plástico, ou seja, o canal de injeção deve estar posicionado sempre paralelo ao deslocamento (no eixo X da cabeça de impressão 3D).

As camadas de MA devem permitir obter uma superfície lisa na cavidade do molde a fim de favorecer o fluxo do material fundido que irá compor as peças fabricadas em MF. Programas computacionais de simulação de injeção podem ser utilizados como ferramenta de análise do comportamento da fabricação das peças principalmente para mostrar os pontos críticos de injeção nos moldes mecânicos.

A análise e estudo de preenchimento de cavidades em injeção plástica via simulação computacional (LOPES *et al.*, 2022) mostram as áreas que recebem maiores pressões e temperaturas ao longo do tempo. A simulação é uma importante ferramenta para indicar as possíveis falhas no molde durante as análises evitando que isso ocorra na fabricação.

Após a conclusão do estudo de simulação computacional, observa-se o comportamento das peças do tipo 1 na região de injeção em plástico considerada mais crítica. Note que essa região é a que possui a maior temperatura e pressão ($\sim 110^{\circ}\text{C}$ e $\sim 40\text{Mpa}$) no início do preenchimento com plástico.

Figura 8 - Análise da simulação computacional na peça do tipo 1. As regiões destacadas com círculos (cor branca) mostram a parte mais crítica na fabricação.



Fonte: Próprios Autores.

Isso mostra como a simulação computacional é importante na fase de desenvolvimento, incluindo o início das fabricações de protótipos físicos reais que devem sempre aguardar as análises de simulação para correção e ajustes necessários nos modelos digitais em 3D.

6 Resultados dos Testes

O molde mecânico híbrido foi montado na injetora de plástico para realizar os ensaios e testes construtivos. Foram estimados os parâmetros para a construção dado que este molde mecânico híbrido é diferente dos tradicionais. Durante os ensaios de fabricação nesse caso a atenção ao processo foi maior, e foi aplicada pressão de injeção inferior a usual cerca de ~20% (vinte por cento) menor.

O molde mecânico híbrido funciona com sistema de refrigeração via água resfriada, sendo que a temperatura é monitorada durante o processo de fabricação devido a influência na viscosidade do material fundido nos moldes no qual a temperatura recomendada para o molde mecânico é entre ~45 e ~50°C.

O ciclo de injeção em plásticos com os moldes mecânicos híbridos é maior que o tradicional construído com MS. Isso ocorre devido a abertura do molde mecânico híbrido para a verificação da temperatura, com a refrigeração forçada via ar comprimido e a aplicação de um tipo de desmoldante a base de água.

A temperatura de injeção é a temperatura que o material plástico fundido entra na cavidade do molde. Esta temperatura no caso dos testes deste molde mecânico híbrido foi mantida nos valores mínimos. Entretanto, no decorrer dos testes é importante encontrar o equilíbrio entre a temperatura no molde e da viscosidade do plástico fundido (BATISTA *et al.*,

2019). Desta forma, menor será a dificuldade de escoamento do plástico para realizar o preenchimento da cavidade, e por consequência a formação completa da peça com qualidade.

Na Figura 9 é possível notar que durante os testes, foram realizadas aproximações gradativas de preenchimento utilizando a metodologia de preenchimento incompleto, até que a peça seja totalmente formada.

Figura 9 - Teste de preenchimento incompleto da peça tipo 2 em molde mecânico híbrido.



Fonte: Próprios Autores.

Após a injeção de 5 (cinco) peças do tipo 1, o molde mecânico em MA se deformou na região mais crítica (visto no destaque na Figura 8), que impediu a continuidade dos testes. A deformação foi provocada na região que ocorreu a maior pressão e temperatura, justamente no local que existem ressaltos que não resistiram à deflexão.

Com relação a peça do tipo 2, os testes ocorreram sem problemas e foram fabricadas no total 25 (vinte e cinco) peças necessárias para o teste. As peças foram dimensionadas e comparadas com os valores de referência, além da observação de empenamento e problemas de preenchimento ou rebarbas.

Nesse tipo de peça foi percebida a formação e a presença de rebarbas na região de saída de gás. Entretanto, isso não foi considerado como um problema dado que esta região não possui funcionalidade, não interferindo na eficiência da peça do tipo 2.

O dispositivo porta moldes em aço é utilizado para alojar o molde mecânico híbrido o que permite a utilização de um único molde por vez. Desta forma é possível utilizar moldes intercambiáveis em diferentes tipos de peças utilizando o mesmo porta molde o que representou uma economia em tempo e em custo.

7 Discussão e Perspectivas Futuras

A evolução da indústria com a MA está mudando os processos produtivos. Isso fica evidenciado nessa pesquisa através da fusão de manufaturas para a construção de moldes mecânicos híbridos utilizados em injeção de plástico em MF.

O molde mecânico em MA feito de resina plástica necessita, como apresentado anteriormente, o controle da temperatura e pressão no molde mecânico híbrido para garantir uma maior vida útil e a estabilidade dimensional das peças.

Em moldes mecânicos híbridos o ciclo de produção é mais longo devido às características de baixa troca térmica. Entretanto, nessa aplicação, com pequenos lotes de peças, este efeito não foi considerado um problema.

No caso da fabricação de via a MA em metal, isso pode aumentar a produtividade dos moldes mecânicos, e a qualidade final das peças injetadas. Devido a maior eficiência que ocorre na troca térmica obtida pela construção de canais de refrigeração com geometrias eficientes. Entretanto, isso ainda não foi testado nessa pesquisa.

Com a opção de utilizar a união das manufaturas em moldes mecânicos híbridos para a construção de peças devem ser consideradas com uma boa opção na indústria.

Conforme apresentado, o estudo com peças do tipo 2 obtiveram bons resultados uma vez que as medidas de desvio padrão do processo ficaram dentro dos valores esperados. Isso corrobora com as pesquisas e demonstra que essa técnica de união de manufaturas para fabricação de moldes híbridos pode ser aplicada na produção de peças similares.

O processo tradicional de fabricação em MS utilizado em moldes mecânicos possui altos custos, e os prazos de fabricação quase sempre são fatores limitantes na produção de peças. A comparação dos custos envolvidos na fabricação de moldes mecânicos em MS exige a utilização de ferramentas e máquinas de alta precisão, e profissionais especialistas, que além de serem muito valorizados, também são raros de serem encontrados atualmente.

O molde mecânico híbrido dessa pesquisa permitiu reduzir o prazo de fabricação de forma significativa com o uso da MA. Segundo os testes realizados e apresentados nesse artigo, a fabricação foi ~11 (onze) vezes mais rápida e o custo cerca de ~5 (cinco) vezes menor quando comparados com a manufatura tradicional (MS).

Esses resultados comprovam que a utilização progressiva nas substituições de MS por MA será cada vez mais importante para a fabricação de peças na indústria do futuro.

Referências

ALCALDE E.; WILTGEN, F., Estudo das Tecnologias em Prototipagem Rápida: Passado, Presente e Futuro. **Revista de Ciências Exatas da Universidade de Taubaté (UNITAU)**. v.24(02), pp.1-9, 2018.

ARORA, N., Design and Manufacturing Injection Mould Conformal Cooling Channels using Additive Manufacturing. **International Journal of Mechanical and Production Engineering**. v.7, pp.56-57, 2019.

- BATISTA, E.R.S; FRANCELINO, G.; MICAEL, T.P.; OLIVEIRA, D., A Importância dos Sistemas de Refrigeração em Moldes de Injeção: Análise de um Processo de Fabricação pelo Ponto de vista Termodinâmico. **XIII Mostra Científica (CESUCA)**. Cachoeirinha, pp.1-13, 2019.
- BARBOSA, F.A.; HELLENO, A.L.; JUNIOR, M.V.; VELÁZQUEZ, D.R.T. Vantagens e Desafios da Manufatura Híbrida - Integrando Manufatura Aditiva e Subtrativa. **XXXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Santos, 15 a 18 de outubro, pp.1-18, 2019.
- BUAINAIN, A.M; BUENO, C.S.; SOUZA, R.F., Propriedade Intelectual, Inovação e Desenvolvimento: Desafios para o Brasil. **Associação Brasileira de Propriedade Intelectual (ABPI)**. pp.1-112, 2018.
- CHEN, Y., 3D Printed Injection Mold: All You Need to Know. **3D Printing Magazine (All3DP)**. pp.1-10, 2020.
- CORTINA, M.; ARRIZUBIETA, J.I.; RUIZ, J.E.; UKAR, E. Latest Developments in Industrial Hybrid Machine Tools that Combine Additive and Subtractive Operations. **Journal Materials**. pp.1-27, 2018.
- DE BLASIO, C.A., Solução de Defeitos na Moldagem por Injeção de Termoplásticos. **Dissertação (Mestrado) na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)**. 2007. 150p.
- DRECHSLER, M.F.; MARIN, F.; SACCHELLI, C.M.; SANTIAGO, R.A.; SIMÃO, I.T. Investigação da Influência de Moldes Híbridos Fabricados pela Técnica de FDM para Injeção de Peças Plásticas. **22º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECiMat)**. Natal, 6 a 10 de novembro, pp.05-06, 2016.
- GOMES, J.; WILTGEN, F. Avanços na Manufatura Aditiva em Metais: Técnicas, Materiais e Máquinas. **Revista Tecnologia**. v.41(01), pp.1-16, 2020.
- GRIFFIN, M., 3D Printing vs Injection Molding – Know the Differences. **3D Printing Magazine (All3DP)**. pp.1-8, 2019.
- HARADA, J., Moldes para Injeção de Termoplásticos: Projetos e Princípios Básicos. **Artliber**. 2004. 308p.
- JÚNIOR, R.S.A., Proposta de Utilização de Ferramentas CAE no Planejamento do Processo de Moldagem por Injeção de Termoplásticos em Moldes de Estereolitografia. **Tese (Doutorado) na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)**. 2003. 176p.
- LOPES, M.; WILTGEN, F., Manufatura Aditiva na Indústria Automotiva voltada para Sistemas de Segurança Veicular. **Coletânea Especial de Engenharia de Produção 2**. Ed. Kreatik, cap.13, pp.183-196, 2021.
- LOPES, M.; WILTGEN, F., Construção de Protótipos Experimentais via Manufatura Aditiva - Inovação em Sistemas de Segurança Veicular. **Revista de Engenharia e Tecnologia**. v.14(01), pp.1-11, 2022.

LOPES, M.; TAMANINI, C.; WILTGEN, F.; CRUZ, F., A Importância das Simulações na Manufatura Aditiva de Moldes Mecânicos. **Revista Mundi**. Aguardando publicação. pp.1-24, 2022.

MARQUES, S.; SOUZA, A. F.; MIRANDA, J.; YADROITSAU, I. Design of Conformal Cooling for Plastic Injection Moulding by Heat Transfer Simulation. **Polímeros**. v.25(06), pp.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) na Universidade da Região de Joinville (UNIVILLE)**. 2017. 112p.

NOGUEIRA, A.L.; MIRANDA D.A. Influência dos Parâmetros de Processo e da Presença de Saídas de Gases na Eficiência de Moldes de Injeção de Peças em Poliestireno Cristal. **14º Congresso Brasileiro de Polímeros (CBPOL)**, Águas de Lindoia, 22-26 de outubro, pp.05-07, 2017.

SANTANA, L., Avaliação das Capacidades da Impressão 3D de Baixo Custo na Fabricação de Snap. **Tese (Doutorado) na Universidade do Porto (FEUP)**. 2019. 251p.

SENHORAS, E.M.; TAKEUCHI, K.P. Gestão da Inovação no Desenvolvimento de Novos Produtos. **IV Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia (SEGeT)**. Resende, 22-24 de outubro, pp.1-15, 2006.

TAMANINI, C.; WILTGEN, F., Moldes com Múltiplos Canais Refrigeração via Manufatura Aditiva. **Workshop Engenharia Mecânica (WEN2021) Desafio da Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico na Engenharia em Tempos de Pandemia**. São Paulo, 28 de setembro. pp.1-14, 2021.

TAMANINI, C; WILTGEN, F., Canais de Refrigeração Ramificados e Capilares para Moldes Mecânicos Fabricados via Manufatura Aditiva. **XI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM)**. Teresina, 07 a 11 de agosto. Aguardando publicação. pp.1-6, 2022.

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

WILTGEN, F.; ALCALDE, E., Prototipagem Rápida Aditiva Aplicada em Dispositivos Funcionais de Auxílio Humano. **10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF)**. São Carlos, 5 a 7 agosto, pp.1-6, 2019.

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

WILTGEN, F., Manufatura Aditiva em Metais - Leve, Forte e Inovador. **Interfaces Científicas - Exatas e Tecnológicas**. v.13(02), pp.1-12, 2021A.

WILTGEN, F.; GOMES, J., Simulação Fluidodinâmica de Trem de Pouso de Aeronaves: Manufatura Aditiva versus Manufatura Subtrativa. **Revista de Engenharia e Tecnologia**. v.13(04), pp.75-84, 2021.

WILTGEN, F., Perspectivas da Manufatura Aditiva na Construção de Alimentos. **Revista de Engenharia e Tecnologia**. v.13(04), pp.29-45, 2021B.

WILTGEN, F., Projetos Baseados em Requisitos. **Revista de Engenharia e Tecnologia**. v.14(01), pp.240-251, 2022.

KOCHOV, A., Mold Design and Production by Using Additive Manufacturing (AM) - Present Status and Future Perspectives. **International Scientific Journal Industry 4.0**. v.3(02), pp.82-85, 2018.