

Fusão da manufatura aditiva e subtrativa na construção de moldes mecânicos híbridos para aplicação em manufatura formativa

Fusion of additive and subtractive manufacturing in the construction of hybrid mechanical molds for application in formative manufacturing.

Fusión de la manufactura adictiva y sustractiva en la construcción de moldes mecânicos híbridos para aplicación en manufatura formativa

Resumo

Este artigo apresenta a pesquisa realizada na fusão da manufatura aditiva com a manufatura subtrativa, para a construção de moldes 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 híbrido e os resultados obtidos com este processo. Nesta pesquisa foram testadas duas peças diferentes (forma geométrica, tamanho e função) utilizando os moldes 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 ainda estão em consolidação e adaptação na indústria o que permite a pesquisa científica aplicada ser inovadora neste seguimento. As perspectivas para a fusão das manufaturas em outras aplicações e seu amadurecimento em técnicas, máquinas e materiais vão permitir muitos avanços na indústria ao longo do futuro próximo.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva; Impressão 3D; Manufatura Subtrativa; Manufatura Formativa; Moldes híbridos; Protótipos.

Abstract

This article presents the research on the fusion of additive manufacturing with subtractive manufacturing for the hybrid plastic injection mold construction for application in formative manufacturing. The research shows the analysis of the application of high-resistance resins for use in hybrid mold production and the results obtained with this process. In this research, two diverse pieces (geometric shape, size, and function) were tested using hybrid molds. The promising results are presented and discussed throughout this article. The merger of manufacturers allows us to speculate that their use will meet in cost and manufacturing time improvements. The current competitiveness in the global automobile industry has stimulated the development and application of new techniques, which are still being consolidated and adapted in the industry, which allows applied scientific research to be innovative in this segment. The prospects for the fusion of manufacturing into other applications and its maturation in techniques, machines, and materials will allow many advances in the industry over the near future.

Keywords: Additive Manufacturing; 3D printing; Subtractive Manufacturing; Formative Manufacturing; Hybrid molds; Prototypes

Resumen

Este artículo presenta la investigación realizada en la fusión de la manufactura adictiva con la manufactura sustractiva, para la construcción de moldes híbridos de inyección

Marcelo Lopes



Universidade de Taubaté-UNITAU
Marcelolopes5x@gmail.com

Filipe Wiltgen



FATEC – Pindamonhangaba e
Cruzeiro
Filipe.Wiltgen@fatec.sp.gov.br
ProfWiltgen@gmail.com

plástica para aplicación en manufactura formativa. La investigación presenta el análisis de la aplicación de resinas de alta resistencia para la utilización en la producción de un molde híbrido y los resultados obtenidos con este proceso. En esta investigación fueron testadas dos piezas distintas (forma geométrica, tamaño y función) utilizando los moldes híbridos. Los resultados promisoros son presentados y discutidos a lo largo de este artículo. La fusión de las manufacturas permite especular que su utilización vaya de encuentro con las mejoras de coste y plazo de fabricación. La actual competitividad en la industria automovilística mundial tiene estimulado el desarrollo y la aplicación de nuevas técnicas las cuales todavía están en consolidación y adaptación en la industria, lo que permite la investigación científica aplicada ser innovadora en este seguimiento. Las perspectivas para la fusión de las manufacturas en otras aplicaciones y su madurez en técnicas, máquinas y materiales van a permitir muchos avances en la industria a lo largo del futuro cercano.

Palabras clave: *Manufactura Adictiva; Impresión 3D; Manufactura Sustractiva; Manufactura Formativa; Moldes híbridos; Prototipos.*

1 Introdução

Na indústria há sempre a necessidade de inovar e desenvolver itens novos e complexos, preferencialmente no menor tempo e custo possíveis. Na visão dos executivos, isso se traduz em propaganda tornando-se um grande diferencial competitivo industrial (Buainain, 2018; Marques *et al.*, 2015).

Diferentemente do processo convencional (manufatura subtrativa) utilizado para construir e desenvolver moldes, no qual o custo e o tempo quase sempre são um problema competitivo. O crescimento empresarial no mercado tem correlação com o desenvolvimento de novos processos e novos produtos (Senhoras; Takeuchi; Takeuchi, 2007), a ideia nessa pesquisa foi fundir a manufatura aditiva com a manufatura subtrativa, e assim aproveitar o melhor das duas técnicas no desenvolvimento de moldes mecânicos híbridos. A nova técnica, embora possua limitações em relação ao molde convencional, até o momento atende à necessidade de produção de pequenos lotes de peças e reduz o prazo do desenvolvimento do projeto.

As necessidades atuais de competitividade na indústria automobilística, bem como os estímulos financeiros subsidiados pelo governo federal, têm proporcionado o desenvolvimento científico e tecnológico nesse setor. É fato que o desenvolvimento de projetos em pesquisa aplicada é algo inovador neste seguimento da indústria, no qual a distância do setor para os atuais desenvolvimentos em pesquisas científicas na acadêmica ainda não é rotineira. Isso interfere na evolução industrial nacional em relação à indústria mundial.

O principal diferencial dessa pesquisa é na utilização da manufatura aditiva aplicada na construção de parte dos moldes mecânicos de injeção em plástico aliada à manufatura subtrativa e, dessa forma, possibilitar maior agilidade na execução da fase de validação de produto, o que impacta na redução de custos e prazos de fabricação.

Empresas que produzem peças que utilizam plásticos (polímeros), como matéria-prima, quase sempre precisam se preocupar em manter suas propriedades físicas e mecânicas e, assim, tornam-se candidatas óbvias para a aplicação dessa nova técnica.

1.1 Objetivo e justificativa

Essa pesquisa tem como objetivo realizar o estudo e a análise da engenharia de manufatura aditiva aplicada (experimental e prática) na construção de moldes de injeção plástica do tipo híbrido, ou seja, construindo o dispositivo e utilizando a manufatura aditiva em conjunto com a manufatura subtrativa, com o intuito de fabricar uma restrita quantidade de peças em manufatura formativa para avaliação, teste e validação da fusão destas técnicas de manufatura para desenvolver um novo processo que permita produzir muitas peças com os moldes mecânicos híbridos (Lopes; Wiltgen, 2020).

A pesquisa visa obter os parâmetros técnicos de análise que permitam investigar profundamente os impactos no processo de produção híbrida, utilizando os moldes mecânicos desenvolvidos com a manufatura aditiva para a produção com manufatura formativa de forma experimental (Tamanini; Wiltgen, 2021a; Tamanini; Wiltgen, 2021b).

A proposta da pesquisa em fusão de manufaturas possui relevância científica para a evolução da engenharia, permitindo o aumento da flexibilidade construtiva e a redução do tempo de produção, tanto em pequena escala, nesse momento de implementação, quanto em larga escala industrial no futuro próximo (Lopes; Wiltgen, 2021a; Lopes; Wiltgen, 2021b).

2 Diferença entre os tipos de manufatura

A indústria passou por uma grande evolução durante as últimas décadas, esta evolução é verificada nas metodologias do processo produtivo, desenvolvimento de novos materiais, utilização de novas tecnologias de manufatura e conseqüentemente novos produtos.

Nessa pesquisa é dado ênfase nos processos de manufatura aditiva, subtrativa e formativa. As principais diferenças nesses processos de fabricação podem ser observadas na Figura 1 (Wiltgen, 2019).

A manufatura formativa é utilizada quase sempre para a produção em larga escala, devido ao acabamento, precisão (Miranda, 2017) e custo de produção.

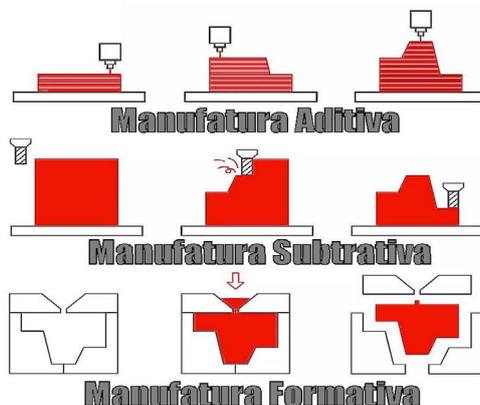
Na manufatura subtrativa, a peça é construída com a remoção de material de um determinado tipo de matéria-prima. Esse processo pode ser obtido com o torneamento, o fresamento, entre outros. A manufatura subtrativa possui alta precisão geométrica, e ótimo acabamento superficial, porém estes resultados dependem tanto da qualidade da máquina quanto da experiência profissional do operador que utiliza a máquina.

A tecnologia mais recente e inovadora é a manufatura aditiva que começou a se consolidar na década de 80 (Alcalde; Wiltgen, 2018; Wiltgen, 2021b). A manufatura aditiva é um processo de fabricação que utiliza um desenho ou modelo 3D em CAD (*Computer Aided Design* – Desenho Assistido por Computador) no qual é inserida a peça que se deseja confeccionar o tipo e a quantidade de matéria-prima necessária para a fabricação em 3D, no qual é depositado, camada por camada (eixo Z), a forma geométrica de uma camada por vez (eixo X e Y).

Inicialmente desenvolvida para a fabricação de protótipos físicos (Wiltgen, 2019), a manufatura aditiva tem evoluído em precisão e em materiais que vão desde resinas a metais nobres (Alcalde; Wiltgen, 2018). 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, assim, não gera desperdício de materiais, não existe restrição geométrica e não necessitam de moldes (Barbosa *et al.*, 2019).

A manufatura formativa do processo de injeção de termoplástico é utilizada quase sempre para a produção em larga escala, devido ao acabamento, precisão (Miranda, 2017) e custo, em diversos seguimentos industriais. Para conformar peças, na forma que é desejada, é necessário um molde. Por definição, diz-se que um molde é um modelo de uma cavidade com a geometria da peça no qual se introduz material líquido ou semilíquido, e que quando se solidifica fica com a mesma forma do molde (Harada, 2004).

Figura 1 – Processos de Manufatura (Aditiva, Subtrativa e Formativa). Em vermelho o objeto construído.

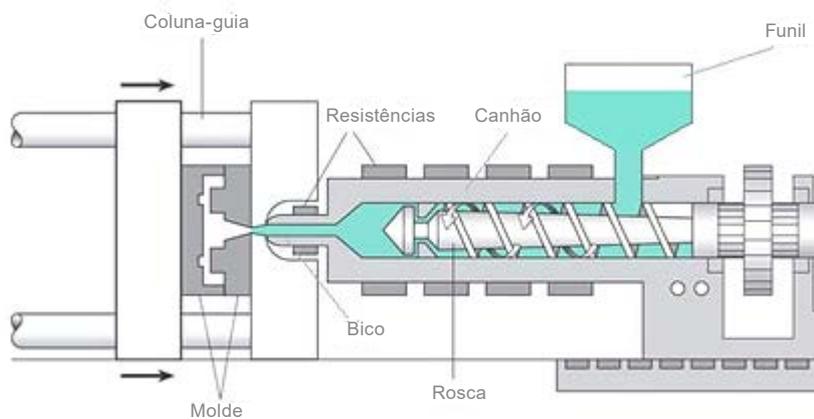


Fonte: Wiltgen (2019)

Os termoplásticos, quando aquecidos, se transformam no estado físico de líquido (viscoso) que possibilita o processo de conformação nas mais diversas formas geométricas. Ao se resfriar, voltam ao estado físico sólido (Marques Junior; Costa, 2019) podendo ser utilizadas em diferentes peças. Esse processo pode ser reversível, diferente dos elementos de matéria-prima do tipo termo fixos que não podem ser novamente conformados a partir de um aquecimento. Essa característica dos termoplásticos é importante para o processo de injeção.

O processo de injeção consiste nas seguintes etapas: a matéria-prima, que se encontra na forma de grãos sólidos, é inserida na máquina injetora através do funil e é direcionada para o cilindro de plastificação que em seu interior possui uma rosca sem fim que conduz a matéria-prima. O aquecimento da matéria-prima, até que atinja o estado viscoso, é feito por resistências elétricas. Ao final do percurso, o polímero fundido passa pelo bico injetor, penetra no molde e preenche a cavidade no interior da matriz bipartida. É mantido uma pressão até que o polímero fundido seja resfriado e solidificado. Ao final desta etapa, o molde se abre e a peça é extraída e imediatamente se inicia um novo ciclo. Esse processo pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 – Processo de manufatura formativa via injeção de termoplástico.



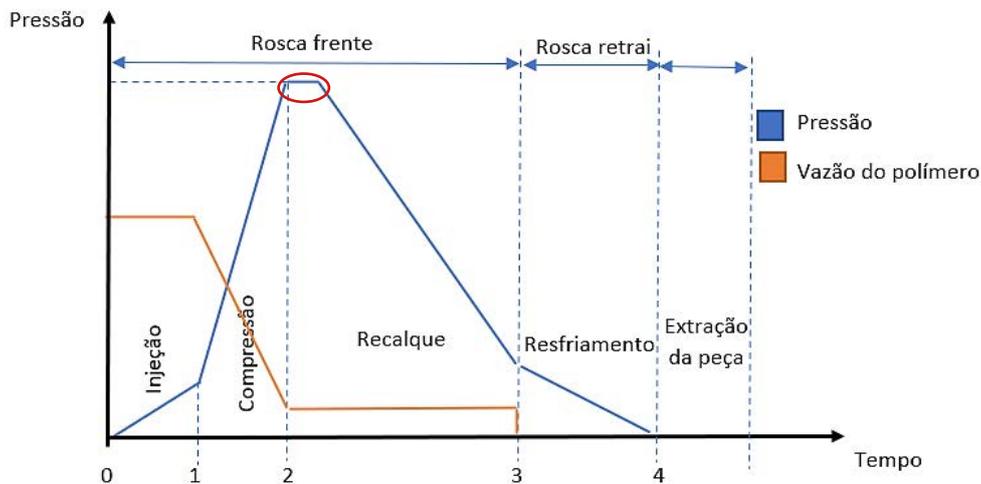
Fonte: Adaptada de FER-PLASTIC (2016).

Para cada peça produzida em manufatura formativa, acontece um ciclo completo de fabricação no qual os parâmetros principais são a pressão e a temperatura do polímero fundido. Esses parâmetros devem ser bem controlados para que a qualidade da peça produzida no processo esteja de acordo com o especificado.

Na Figura 3, pode ser observado o ciclo de produção de peça com manufatura formativa com as principais fases do processo, assim como, a variação de pressão em função do tempo.

Observe na Figura 3, que na fase inicial, a rosca avança e transfere o material fundido para dentro da cavidade do molde, até o preenchimento total. Na sequência ocorre a fase de compressão, e a pressão aumenta para a pré-compactação do produto, a fim de compensar a redução volumétrica da peça (contração do material). Na sequência, aplica-se o processo de recalque que faz a compactação final do material, garantindo a geometria da peça. Na Figura 3, é possível observar o destaque (em vermelho) que representa a fase mais crítica do processo para a resistência do molde 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.

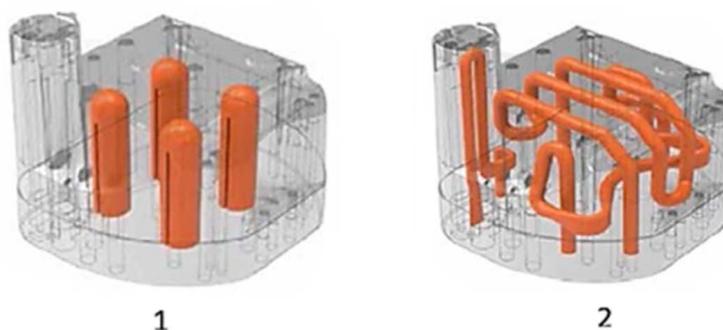
3 Fusão das manufaturas aditiva e subtrativa em moldes híbridos.

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

Considerando que a manufatura híbrida busca maximizar as vantagens dos diferentes processos, o molde híbrido é construído com diferentes propósitos. Um destes propósitos é o aumento da produtividade em um processo de injeção plástica com manufatura aditiva a ser aplicada no molde híbrido. Considerando que a maior parte do tempo de fabricação via injeção plástica está no resfriamento do molde, é possível construir canais de resfriamento mais eficientes com manufatura aditiva, e isso reduz o ciclo de injeção de plástico e, conseqüentemente, o aumento da produção.

Canais de resfriamento construídos via a manufatura subtrativa são furos lineares, devido a limitação da construção geométrica, que causa um baixo rendimento na troca de calor e o resfriamento da peça de forma desigual. Esse problema pode ser evitado com a construção de canais de resfriamento via a manufatura aditiva que não possui limitação de construção geométrica das peças. Um projeto de canal mais eficiente e homogêneo faz muita diferença na confecção da peça e conseqüentemente na sua produção, como pode ser observado na Figura 4 as diferenças de canais (cor laranja) em manufatura subtrativa e manufatura aditiva. Os canais eficientes devem ser posicionados o mais próximo possível da geometria que forma a peça (cor cinza), obtendo um resfriamento eficiente (Arora, 2019).

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



Fonte: Adaptado de KOCHOV (2018).

A matriz que suporta os moldes deve ser construída em metal, portanto a matriz também pode vir a ser construída via a manufatura aditiva com a utilização de máquina de manufatura aditiva em metais (Gomes; Wiltgen, 2020). Existe uma variedade de materiais metálicos disponíveis, a utilização da tecnologia no futuro próximo na construção de matrizes e moldes pode impactar muito na produtividade e na melhora da qualidade da peça injetada (Marques *et al.*, 2015).

Para produzir pequenos lotes de peças via injeção em plástico, com tempo e custo, deve ser reduzida a estratégia adotada de utilização de moldes híbridos (Griffin, 2019). Um molde híbrido é construído em resina de alta resistência com o uso de manufatura aditiva em máquinas de jateamento de material, o que proporciona melhor acabamento superficial e resistência mecânica adequada.

4 A importância na fabricação da prototipagem rápida

A prototipagem rápida é uma técnica utilizada para acelerar o desenvolvimento de projetos, quase sempre é baseado na confecção de protótipos em material similar ou o mesmo material no qual será desenvolvido o projeto. 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 à uma peça ou projeto que está em fase de desenvolvimento. Assim sendo, pode ser aplicado para estudos de forma, avaliação funcional, análise dos processos de fabricação; o que de fato é fundamental, pois permite uma avaliação adequada antes do processo de manufatura contínuo e definitivo. A utilização de tecnologia de prototipagem rápida permite a agilidade necessária para garantir a inovação na indústria.

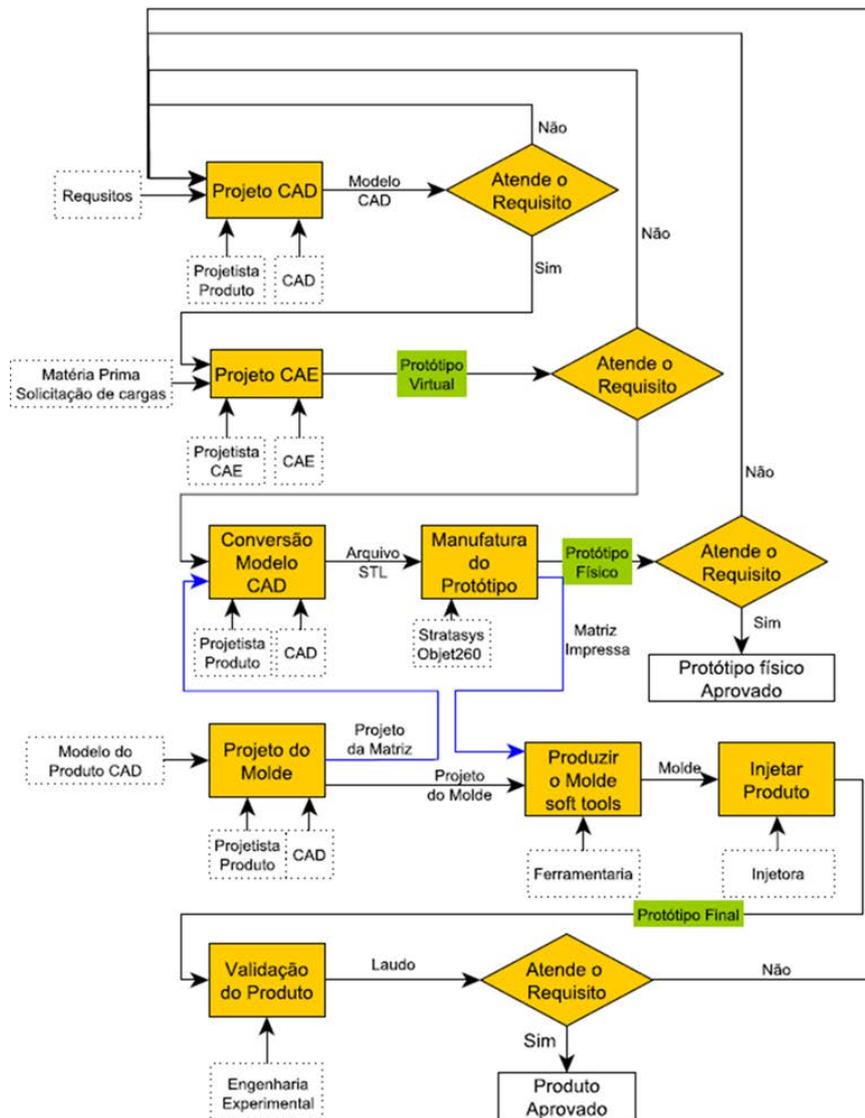
Durante o processo de desenvolvimento de uma peça são gerados diversos protótipos, os quais são exaustivamente testados e aprimorados, até que finalmente atendam todos os requisitos impostos pelo projeto para que possam ser desenvolvidos como um produto.

O processo completo de prototipagem inclui diversas fases de desenvolvimento que tem início com o projeto em CAD (CAD – *Computer Aided Design*), com protótipos virtuais. A modelagem mecânica do projeto é realizada peça por peça, as quais passam por diversas avaliações e simulações computacionais, como interferências mecânicas funcionais e o estudo de cadeia de tolerâncias.

No desenvolvimento de CAE (CAE – *Computer Aided Engineering*) são realizadas análise de elementos finitos, ensaios virtuais com carregamento das propriedades físicas e das solicitações de cargas baseadas na especificação e aplicação do produto.

Na Figura 5, tem-se o fluxograma do processo de desenvolvimento de uma peça com ênfase da aplicação dos diferentes tipos de protótipos para cada fase.

Figura 5 – Fluxograma do processo completo de desenvolvimento de protótipos experimentais.



Fonte: Próprios Autores.

Logo que as validações do protótipo virtual sejam satisfeitas, inicia-se a construção de um protótipo físico real. Isso sempre é necessário devido à 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. Assim, com os protótipos construídos podem ser realizadas montagens e manuseios ergonômicos.

Porém, sempre existem tipos de peças que, devido a sua aplicação e sua sequência de ensaios e testes (Wiltgen, 2020), é necessário a construção de pequenos lotes com suas características físicas de projeto (técnica de processo e tipos de matéria-prima). Estes quase sempre são chamados de protótipos finais.

Isso se faz necessário para a realização de ensaios físicos (temperatura, humidade, pressão e ciclagem mecânica), que podem influenciar o desempenho da peça. Quando as peças são injetadas, ou seja, manufatura formativa, a solução é produzi-las em um molde de baixo custo (*Soft Tools*), com matrizes construídas em manufatura aditiva. 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, 2021a; Wiltgen, 2022).

5 Manufatura aditiva no processo de construção 3D

A evolução das tecnologias em manufatura aditiva (impressão 3D) vem proporcionando a construção de novas máquinas, com possibilidade de produzir peças com maior precisão e diferentes tipos de materiais (Wiltgen, 2019, Alcalde; Wiltgen, 2018; Gomes; Wiltgen, 2020).

O processo de manufatura aditiva se caracteriza pela inclusão de materiais para a fabricação de peças. Segundo as normas técnicas (ASTM, 2021), existem sete tipos de técnicas que aplicam diferentes tecnologias na construção 3D. Estas se diferenciam em função do processo e do tipo de matéria-prima empregada (Gomes; Wiltgen, 2020; Santana, 2019). No Quadro 1 podem ser observadas as diferentes técnicas de manufatura aditiva

Quadro 1 – Técnicas, processos e estado físico dos materiais na manufatura aditiva.

Processos de Manufatura Aditiva (MA)														
Processos	Processos MA baseados em laser					Extrusão térmica	Jateamento de material	Adesão de material	Feixe de elétrons					
	Fusão a laser		Polimerização a laser											
Esquemático														
Nome Material	SLS		DMD		SLA		FDM		3DP		LOM		EBM	
	SLM		LENS		SGC		Robocasting		IIP		SFP			
	DMLS		SLC		LTP				MJM					
			LPD		BIS				PolyJet					
					HIS				Thermojet					
Estado do material		Pó		Líquido		Sólido								

Fonte: Adaptado de Santana (2019).

A tecnologia de manufatura aditiva mais relevante para essa pesquisa é a de jateamento de material (*PolyJet*) que faz uso de matéria-prima líquida.

Essa técnica consiste em uma extrusora (cabeça de impressão) que deposita gotas de matéria-prima no estado líquido, preenchendo a área de uma camada e 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.

O processo de fabricação, do tipo jateamento de material, usa a matéria-prima líquida para formar cadeias poliméricas. A solidificação da camada anteriormente depositada é realizada através da radiação de um feixe de luz Ultravioleta (UV). Logo que a luz UV 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, um outro tipo de material menos nobre e solúvel em água, destinado apenas para a fabricação de suportes removíveis e descartáveis (Chen, 2020).

Existe uma variedade de materiais disponíveis para fabricação de moldes de injeção para impressão em 3D (PETG (tereftalato de polietileno), ABS (acrilonitrila butadienoestireno), Nylon (conhecido como poliamida), PP (polipropileno) e POM (polioximetileno)). A matéria-prima utilizada nessa pesquisa para a construção dos moldes híbridos foi o RGD-515 e RGD-531 (materiais da empresa *Stratasys*) (Technical [...], 2020), que possuem, em suas composições, monômero acrílico, oligômero de uretano, monômero de metacrilato, acrilato de isobornilo, acrilato, acrilato de epóxi e foto iniciador. Essa matéria-prima, após sua mistura e durante a sua fabricação, possibilita construir camadas com espessuras de até 30 µm (trinta micrometros). Após a fabricação da peça possuirá propriedades semelhantes ao polímero do tipo ABS (ABS – Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno).

No Quadro 2 pode-se observar os dados técnicos referentes ao material ABS composto utilizado na pesquisa.

Quadro 2 – Dados técnicos da matéria-prima RGB 515 e 531 (Digital ABS).

PROPRIEDADES	VALORES	UNIDADES
<i>Resistência à Tração</i>	55-60	<i>MPa</i>
<i>Alongamento no Intervalo</i>	25-40	%
<i>Módulo de Elasticidade</i>	2.600-3.000	<i>MPa</i>
<i>Temperatura de Flexão ao Calor(HDT)</i>	82-90	°C
<i>Izod Notched Impact</i>	90-115	<i>J/m</i>
<i>Dureza Mecânica Shore</i>	85-87	<i>Scale D</i>

Fonte: Adaptado de Technical [...] (2020).

6 Matrizes de molde híbridos

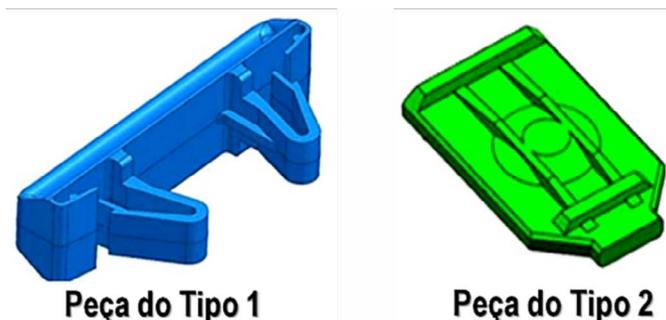
A vida útil de uma matriz fabricada via manufatura aditiva é determinada principalmente pela ação da temperatura e pressão impostas no processo de manufatura formativa, e também, devido às características geométricas da própria peça a ser injetada. Dentre essas características geométricas destacam-se:

- **Ângulo de saída:** nome dado ao ângulo formado entre a face da cavidade da peça e o eixo de abertura do molde, existe restrição à geometria que possui ângulos retos. Esse esforço de extração pode danificar a matriz impressa em 3D, quanto maior o ângulo de saída menor será a força de extração (Ribeiro Junior, 2003)., recomendando-se a utilização de um ângulo mínimo de 5° (Technical [...], 2020) 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 (De Blasio, 2007);
- **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 de matrizes em manufatura aditiva, o uso de elementos móveis, as conhecidas gavetas, bem como pode causar rebarbas devido o atrito com a matriz;
- **Ressaltos na matriz:** durante a injeção, a cavidade da matriz é submetida à 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 (Ribeiro Junior, 2003).
- **Sem revestimentos:** a utilização de revestimentos com de nitreto de titânio para aumentar a resistência mecânica nas matrizes produzidas com a manufatura aditiva não são recomendadas devido ao aumento da temperatura durante ao processo de injeção, o que compromete a durabilidade da matriz e pode alterar a dimensão da peça (Drechsler et al., 2016).

A matéria-prima da peça a ser injetada tem influência direta na vida útil da matriz, sendo que o índice de fluidez dos tipos de polímeros utilizados são a propriedade física que mais impacta na duração da matriz. Isso se dá pelo índice de fluidez, 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, no qual o Tipo 1 (na cor azul) foi produzido utilizando o polímero do Tipo POM (Poliacetil) e a peça do Tipo 2 (cor verde) foi produzida em PE (Poliéster do tipo Elastômero). Ambos tipos de peças e materiais utilizados em sua fabricação podem ser observados no Quadro 3, referente às propriedades da matéria-prima.

Figura 6 – Ilustração dos tipos de peças reais fabricadas e produzidas em plástico com os moldes híbridos.



Fonte: Próprios Autores.

Quadro 3 – Propriedades da matéria-prima utilizada nas peças do Tipo 1 e Tipo 2

MATERIAL	POM	POLIÉSTER ELASTÔMERO	UNIDADES	MÉTODO OU NORMA
<i>Temperatura de Fusão</i>	166	200	°C	ISO 1133
<i>Fluidez</i>	2.2	10	Cm ³ /10min - g/10min	ISO 1133
<i>Deflexão Térmica (HDT)</i>	82-90	56	°C	<i>MethodB</i> (0.45 MPa) ISO 75-1/-2

Fonte: Adaptado de Celanese (2020)

O molde híbrido completo e montado é 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 manufatura formativa 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 as matrizes como esperado para a produção das peças.

Na Figura 7, é possível observar, também, o canal de injeção de plástico que possui uma seção transversal com diâmetro de 5 a 8 mm para o ponto de injeção em forma de leque, e saídas de gás para facilitar o preenchimento da cavidade (Nogueira; Miranda, 2017). Durante o processo de injeção, o molde e as matrizes devem manter uma temperatura controlada, portanto a refrigeração do molde deve ser tal que mantenha uma troca de calor constante.

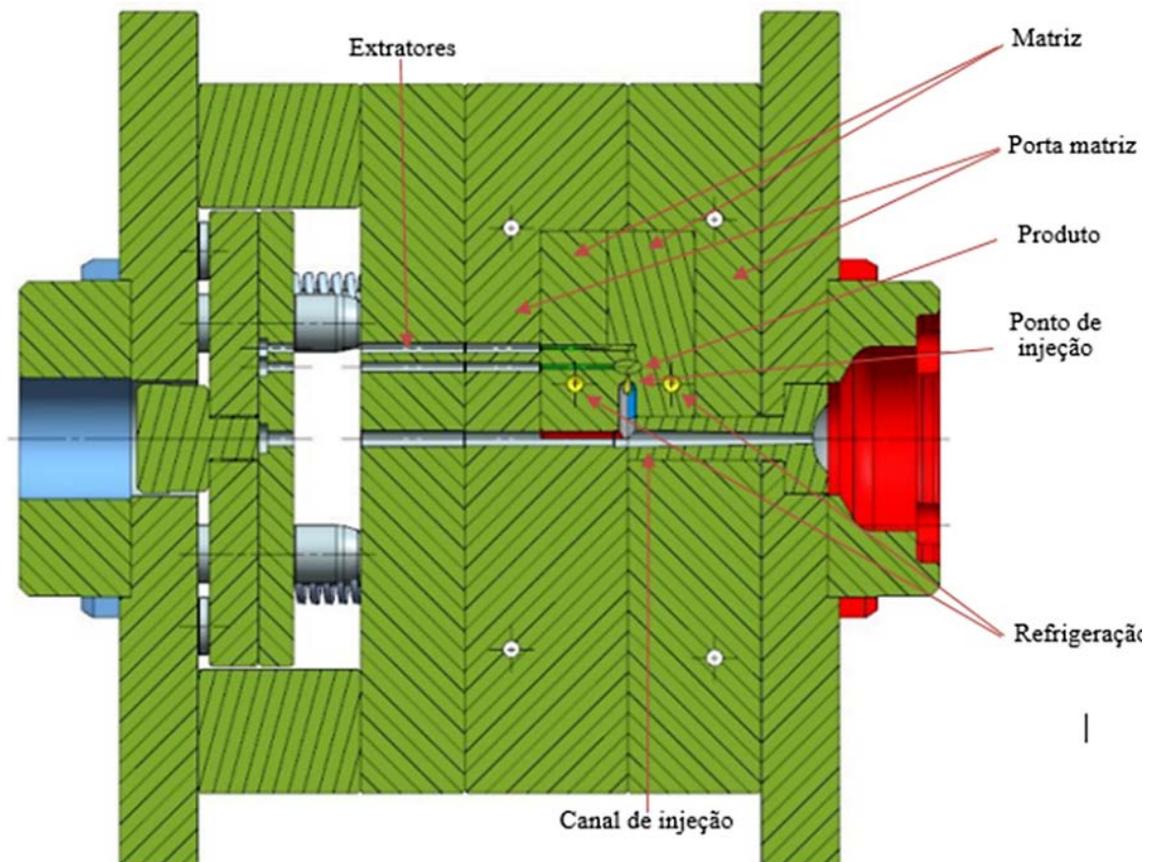
Considerando que o molde híbrido deve produzir uma quantidade reduzida de componentes nesse teste, o molde foi concebido de maneira que a matriz possa ser intercambiável, o que possibilita que o porta-molde seja utilizado em vários tipos de peça.

Para balancear a pressão de injeção do plástico durante o preenchimento das cavidades dos moldes e garantir que o molde se mantenha fechado, é necessário manter uma pressão contrária ou força de fechamento do molde.

As matrizes devem sempre resistir esta tensão de compressão na área de contato na linha de abertura de extração das peças nos moldes.

Essa força de fechamento é determinada pela multiplicação da área projetada da cavidade pela pressão de injeção necessária na fabricação. A pressão de injeção necessária está diretamente relacionada à fluidez da matéria-prima e temperatura do molde utilizadas.

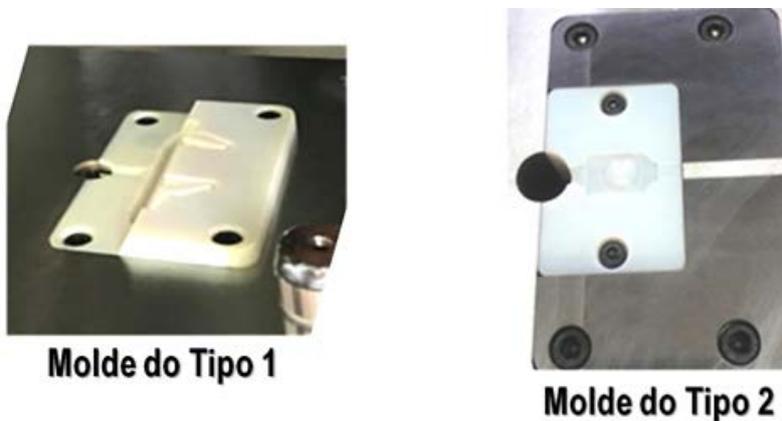
Figura 7 – Ilustração do molde híbrido montado em corte. As setas representam as diversas partes.



Fonte: Próprios Autores.

Para suportar a pressão de injeção do plástico, as matrizes produzidas em manufatura aditiva são alojadas em um bloco de aço produzido em manufatura subtrativa, conforme pode ser visto na Figura 8. Assim sendo, as tensões não atuam diretamente sobre a matriz, e sim na região em aço, evitando deformação prematura da linha de fechamento. Esta estratégia reduz a possibilidade de dilatação térmica da matriz devido à alta temperatura do plástico fundido durante a produção das peças.

Figura 8 – A matriz de resina alojada em bloco de aço para resistir à pressão e dilatação.

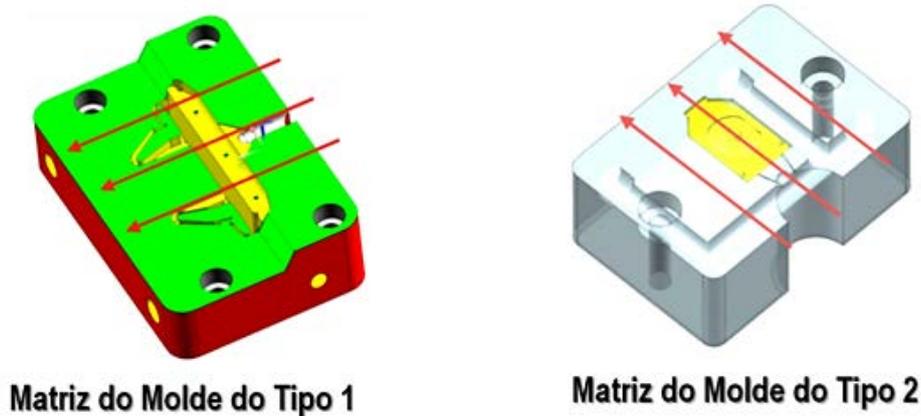


Fonte: Próprios Autores.

Para melhorar a resistência mecânica, e conseqüentemente aumentar a vida útil na matriz, é sempre importante observar o sentido de fabricação da manufatura aditiva (impressão 3D). O sentido 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), conforme pode ser visto nas setas indicativas na cor vermelha, representadas na Figura 9.

Figura 9 – Orientação para a fabricação nas matrizes híbridas.
As setas na cor vermelha na figura indicam a direção de injeção do plástico.



Fonte: Próprios Autores.

As camadas de manufatura aditiva devem permitir e obter uma superfície lisa na cavidade do molde, a fim de favorecer o fluxo do material fundido que irá compor as peças fabricadas em manufatura formativa.

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 em uma matriz híbrida.

A análise e estudo de preenchimento de cavidades em injeção plástica mostram as áreas que recebem maiores pressões, temperaturas e tempo, sendo uma ferramenta útil para indicar as possíveis falhas na matriz durante a fabricação (Lopes *et al.*, 2022).

Após a conclusão do estudo de simulação computacional, na Figura 10, observa-se o comportamento das peças do Tipo 1 à região de injeção em plástico considerada mais crítica. Note que essa região é a que possui a maior temperatura e pressão (112°C e 42 MPa) no início do preenchimento com plástico.

Figura 10 – Análise da Simulação computacional no momento de preenchimento da matriz com plástico para a peça do Tipo 1. As regiões destacadas com círculos (cor branca) mostram a parte mais crítica na fabricação.



Fonte: Próprios Autores

7 Resultados dos ensaios e testes do molde híbrido

O molde 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 híbrido é diferente dos tradicionais. Durante os ensaios de fabricação, nesse caso, a atenção ao processo foi maior e foi aplicada pressão de injeção menor do que a usual em 20% (vinte por cento).

O molde híbrido funciona com sistema de refrigeração via água resfriada, sendo que a temperatura do molde híbrido é monitorada durante o processo de fabricação, assim, devido à influência na viscosidade do material fundido nos moldes híbridos a temperatura recomendada para a matriz é entre 45°C e 50°C.

O ciclo de injeção em plásticos com os moldes híbridos é maior que o tradicional construído com manufatura subtrativa. Isso ocorre, pois em cada abertura do molde híbrido há sempre a verificação da temperatura na matriz, com o resfriamento forçado com ar comprimido e a aplicação de um tipo de desmoldante à 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 do molde híbrido, foi mantida em valores mínimos. Entretanto, no decorrer dos testes, é importante encontrar um equilíbrio entre a temperatura no molde e da viscosidade do plástico fundido (Batista *et al.*, 2019). Desse modo, maior 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 11 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 11 – Teste de preenchimento incompleto da peça Tipo 2 em molde híbrido.



Fonte: Próprios Autores.

Após a injeção de 5 (cinco) peças do Tipo 1, a matriz se deformou na região mais crítica (visto no destaque na Figura 10), 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 à 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 analisadas dimensionalmente 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 presença de rebarbas na região de saída de gás. Entretanto, isso não foi considerado como um problema, dado que esta região não possui funcionalidade, e, desta forma, não interfere na eficiência da peça do Tipo 2.

O porta-matriz em aço utilizado para alojar as matrizes do molde híbrido atendeu aos requisitos de projeto e permitiu o uso de um único porta-molde. Desta maneira, é possível utilizar matrizes intercambiáveis em diferentes tipos de peças que representou uma economia em tempo e custo.

8 Conclusões

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

A matriz produzida em resina plástica necessita, como apresentado, o controle da temperatura no molde híbrido para garantir uma maior vida útil e a estabilidade dimensional das peças.

Em moldes 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.

Não foi testado, e também não fez parte dessa pesquisa, a construção de moldes apenas com a manufatura aditiva, ou seja, utilizando material plástico e metálico.

No caso da fabricação de via a manufatura aditiva em metal, isso pode aumentar a produtividade dos moldes, e a qualidade final das peças injetadas; devido à maior eficiência que ocorre na troca térmica obtida pela construção de canais de resfriamento com geometrias eficientes.

Com a opção de utilizar a fusão de manufaturas e moldes híbridos para a construção de peças, devem ser consideradas com uma opção salutar na competição industrial.

Conforme apresentado, o estudo com peças do Tipo 2 foram consideradas enquanto 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 fusão de manufaturas para moldes híbridos pode ser aplicada na produção de peças similares.

O processo convencional utilizado na fabricação de moldes tem alto custo, e os prazos de fabricação quase sempre são um fator limitante na produção de peças. A comparação dos custos envolvidos na fabricação de moldes em manufatura subtrativa 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 híbrido dessa pesquisa permitiu reduzir o prazo de fabricação de forma significativa com o uso da manufatura aditiva. 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.

Esses resultados comprovam que a utilização progressiva nas substituições de manufatura subtrativa para a manufatura aditiva, serão cada vez mais importantes para a fabricação de peças na indústria do futuro.

Referência

- ALCALDE E.; WILTGEN, F. Estudo das Tecnologias em Prototipagem Rápida: Passado, Presente e Futuro. **Revista de Ciências Exatas da Universidade de Taubaté**, Taubaté, v. 24, n. 2, p. 1-9, 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **ASTM F42/ISO TC 261**: develops additive manufacturing standards. Geneva: ASTM, 2011.
- ARORA, N. Design and manufacturing injection mould conformal cooling channels using additive manufacturing. **International Journal of Mechanical and Production Engineering**, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 56-57, 2019.
- BATISTA, E. R. S.; FRANCELINO, G.; MICAIL, 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. *In*: MOSTRA CIENTÍFICA DO CESUCA, 13., 2019, Cachoeirinha-RS. **Anais** [...]. Cachoeirinha-RS: CESUCA, 2019. p. 1-13.
- BARBOSA, F. A.; HELLENO, A. L.; VIEIRA JUNIOR, M.; VELÁZQUEZ, D. R. T. Vantagens e desafios da manufatura híbrida: integrando manufatura aditiva e subtrativa. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 39., 2019, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: ENEGEP, 2019.
- BUAINAIN, A. M.; BUENO C. S.; SOUZA, R. F. **Propriedade intelectual, inovação e desenvolvimento: desafios para o Brasil**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Propriedade Intelectual, 2018.
- CELANESE. Ficha de especificação técnica de produto HOSTAFORM C 9021. **CAMPUS Online**, Frankfurt, 2020. 6p.
- CHEN, Y. 3D printed injection mold: all you need to know. **3D printing magazine (All 3DP)**, [s. l.], 2020. 10p.
- CORTINA, M.; ARRIZUBIETA, J. I.; RUIZ, J. E.; UKAR, E. Latest developments in industrial hybrid machine tools that combine additive and subtractive operations. **Materials**, Spain, v. 11, n. 12, p. 7-8, 2018.
- DE BLASIO, C. A. **Solução de defeitos na moldagem por injeção de termoplásticos**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007. 150 p.
- DRECHSLER, M. F.; MARIN, F.; SACHELLI, C. M.; SANTIAGO, R. A.; SIMÃO, I. T. Investigação da influência de moldes híbridos fabricados pela técnica de FDM para injeção de peças plásticas. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 22., 2016, Natal-RN. **Anais** [...]. Natal-RN: CBECIMAT, 2016. p. 5-6
- GOMES, J. F. B.; WILTGEN, F. Avanços na manufatura aditiva em metais: técnicas, materiais e máquinas.

Revista Tecnologia, Fortaleza, v. 41, n. 1, p. 1-16, 2020.

GRIFFIN, M. 3D Printing vs injection molding: know the differences. **3D printing magazine** (All 3DP), [s. l.], 2019. 8p.

HARADA, J. **Moldes para injeção de termoplásticos**: projetos e princípios básicos. São Paulo: Artliber, 2004. 308 p.

KOCHOV, A. Mold design and production by using additive manufacturing (am) - present status and future perspectives. **International Scientific Journal "Industry 4.0"**, [s. l.], v. 3, n. 2, p. 82-85, 2018.

LOPES, M.; WILTGEN, F. Manufatura aditiva em moldes mecânicos. *In*: CONGRESSO INTERNACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 9., 2020, Taubaté. **Anais** [...]. Taubaté: CITED, 2020. p.1-14

LOPES, M.; WILTGEN, F. Manufatura aditiva na indústria automotiva voltada para sistemas de segurança veicular. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 41., 2021, Foz do Iguaçu-PR. **Anais** [...]. Foz do Iguaçu-PR: ENEGEP, 2021. p. 1-16

LOPES, M.; WILTGEN, F. Manufatura aditiva na indústria automotiva de segurança veicular. *In*: CONGRESSO INTERNACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO, 10., 2021, Taubaté. **Anais** [...]. Taubaté-SP: Universidade de Taubaté, São Paulo, 2021. p. 1-19

LOPES, M.; TAMANINI, C.; WILTGEN, F.; CRUZ, F. A importância das simulações na manufatura aditiva de moldes mecânicos. **Revista Mundi Engenharia Tecnologia e Gestão**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 396-420, 2022.

MARQUES JUNIOR, G. B.; COSTA, C. A. Manufatura aditiva aplicada na fabricação de insertos para moldes de injeção termoplásticos. **Scientia Cum Industria**, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 76-82, 2019.

MARQUES, S.; SOUZA, A. F.; MIRANDA, J.; YADROITSAU, I. Design of conformal cooling for plastic injection moulding by heat transfer simulation. **Polímeros**, [s. l.], v. 25, n. 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**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) - Universidade da Região de Joinville, Joinville-SC, 2017. 112 p.

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. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 14., 2017, Águas de Lindoia-SP. **Anais** [...]. Águas de Lindoia-SP: CBPOL, 2017. p. 5-7.

RIBEIRO JUNIOR, A. S. **Proposta de utilização de ferramentas CAE no planejamento do processo de moldagem por injeção de termoplásticos em moldes de estereolitografia**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. 176p.

SANTANA, L. **Avaliação das capacidades da impressão 3D de baixo custo na fabricação de SNAP**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2019. 251 p.

SENHORAS, E. M.; TAKEUCHI, K. P.; TAKEUCHI, K. P. Gestão da Inovação no Desenvolvimento de Novos Produtos. *In*: SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, 4., 2007, Rio de Janeiro. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: SEGeT, 2007. p. 1-15.

TAMANINI, C.; WILTGEN, F. Moldes com múltiplos canais de refrigeração via manufatura aditiva. *In*: WORKSHOP DA UFABC EM ENGENHARIA MECÂNICA, 28., 2021, São Bernardo do Campo. **Anais** [...]. São Bernardo do Campo: Universidade Federal do ABC, 2021. p. 1-14.

TAMANINI, C.; WILTGEN, F. Fabricação de moldes mecânicos via manufatura aditiva. *In*: CONGRESSO INTERNACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 10., 2021, Taubaté. **Anais** [...]. Taubaté: Universidade de Taubaté, 2021. p. 1-20.

TECHNICAL application guide. **Stratasys**, Israel, 2020. 11p.

WILTGEN, F. Protótipos e prototipagem rápida aditiva sua importância no auxílio do desenvolvimento

científico e tecnológico. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 10., 2019, São Carlos. **Anais** [...]. São Carlos: ABCM, 2019.

WILTGEN, F. Técnica de ensaios de sistemas complexos com metodologia de engenharia de sistemas & requisitos. **Interfaces Científicas - Exatas e Tecnológicas**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 51-60, 2020.

WILTGEN, F. Testing plan in systems & requirements engineering for strategic engineering areas. *In*: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 26., 2021, Florianópolis-SC. **Anais** [...]. Florianópolis _SC: ABCM, 2021. p. 1-8.

WILTGEN, F. Manufatura aditiva em metais - leve, forte e inovador. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 47-58, 2021.

WILTGEN, F. Projetos baseados em requisitos. **Revista Engenharia e Tecnologia**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 240-251, 2022.

Sobre os autores

Marcelo Lopes

Mestrando em Engenharia Mecânica pela Universidade de Taubaté (UNITAU) em 2020, MBA Gestão de Engenharia de Produto (Universidade de São Paulo, USP) em 2009, Graduação em Engenharia Mecânica (Universidade Paulista) em 2006. Experiência na área de Processos de Injeção de Polímeros, Estamparia e Montagem em Alta Escala e Desenvolvimento de Produto de Segurança Veicular. Atualmente pesquisa e desenvolve produtos no seguimento da industrialização da construção civil.

Filipe Wiltgen

Doutor em Dispositivos Eletrônicos e Computação, na área de Fusão Termonuclear Controlada, utilizando inteligência artificial para controle do plasma de Tokamaks pelo Instituto de Tecnologia de Aeronáutica (ITA) em 2003. Mestre em Dispositivos Eletrônicos e Computação, na área de Fusão Termonuclear Controlada, utilizando controle de campos magnéticos para confinamento e produção de plasma em Tokamaks pelo Instituto de Tecnologia de Aeronáutica (ITA) em 1998. Graduado em Engenharia Elétrica, com ênfase em Eletrônica de Potência, pela Universidade de Taubaté (UNITAU) em 1994. Atuando como professor e coordenador de curso em diversas universidades do Vale do Paraíba desde 2003 (UNIVAP, ETEP, ANHANGUERA e UNITAU). Atualmente atua como professor sênior no CST (Curso Superior em Tecnologia) em Projetos Mecânicos, CST em Manutenção Industrial e CST em Gestão da Produção Industrial, e como coordenador do CST em Processos Metalúrgicos na Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo (FATEC Pindamonhangaba e de Cruzeiro). Além de professor no Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo em Campinas (IFSP Campinas) nos cursos de Técnico em Eletrônica e Engenharia Elétrica.

Avaliado em: 29.11.2023

Aceito em: 03.11.2023