



ARTIGO ORIGINAL

OPEN ACCESS

## APLICAÇÕES DA MANUFATURA ADITIVA E IMPRESSÃO 3D NA FABRICAÇÃO DE MOLDES PARA INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS

### APPLICATIONS OF ADDITIVE MANUFACTURING AND 3D PRINTING IN THE MANUFACTURE OF THERMOPLASTIC INJECTION MOLDS

[Marco Aurélio Feriotti](#)<sup>1\*</sup>, [Davi de Medeiros Marcelino](#)<sup>2</sup>, [Mayara Neves Pohlmann](#)<sup>3</sup>,  
[José Martino Neto](#)<sup>4</sup>, & [Jorge Luiz Rosa](#)<sup>5</sup>

<sup>1 2 3 4 5</sup> [Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza](#) – FATEC Guarulhos.

<sup>1</sup> [marco.a.feriotti@gmail.com](mailto:marco.a.feriotti@gmail.com) <sup>2</sup> [davimarcelino18@gmail.com](mailto:davimarcelino18@gmail.com) <sup>3</sup> [mayara.pholmann@gmail.com](mailto:mayara.pholmann@gmail.com)

<sup>4</sup> [jose.martino@fatec.sp.gov.br](mailto:jose.martino@fatec.sp.gov.br) <sup>5</sup> [jorge.rosa2@fatec.sp.gov.br](mailto:jorge.rosa2@fatec.sp.gov.br)

#### ARTIGO INFO.

Recebido em: 26.02.2021

Aprovado em: 20.09.2021

Disponibilizado em: 22.09.2021

#### PALAVRAS-CHAVE:

Manufatura aditiva; Molde para injeção de termoplásticos; Aplicação da MA em moldes.

#### KEYWORDS:

Additive manufacturing; Thermoplastic injection mold; AM application in molds.

\*Autor Correspondente: Feriotti, M. A.

#### RESUMO

A manufatura aditiva (MA) e a Impressão 3D vem sendo amplamente aplicada em diferentes seguimentos, em particular, no setor de fabricação de moldes para injeção de termoplásticos. Atualmente, a manufatura aditiva de metais necessita de uma solução que combine alto desempenho com baixo custo para tornar essa tecnologia mais aplicável. Esta pesquisa apresenta um estudo de caso realizado em uma empresa do setor onde, em muitos casos, a manufatura aditiva já vem sendo utilizada nos projetos e no processo de fabricação de moldes. Visando embasar este estudo de caso, foram realizadas análises bibliográficas sobre a aplicação da manufatura aditiva na ferramentaria de moldes para injeção de termoplásticos. Dessa forma, foi possível observar que existe uma tendência, no curto e médio prazo, de que a produção de moldes sofrerá um impacto, com o advento desta tecnologia, que pode significar uma mudança nos métodos convencionas de fabricação de moldes, pois, além de inserts, moldes já estão sendo fabricados com uso da MA, porém, na aplicação da manufatura aditiva é

fundamental que o processo utilizado garanta que as peças estejam livres de defeitos ou porosidade. Este estudo também possibilitou constatar que essa tecnologia afetará significativamente os conceitos de novos projetos e resultará em mudanças disruptivas nos métodos convencionais.

#### ABSTRACT

Additive manufacturing (AM) and 3D printing, has been largely applied in different sectors, particularly in the manufacturing of thermoplastic injection molds. Currently, additive manufacturing of metals printing needs a solution that combines high performance with low cost to make this technology more applicable. This research presents a case in a company from the sector where, in many cases, additive manufacturing has already been used in the projects and in the mold manufacturing process. Aiming to support this study, bibliographical analysis were made about the application of additive manufacturing in the tooling of thermoplastic injection molds. Thus, it was possible to observe that there is a trend, in the short and medium term, that the production of molds will suffer an impact, with the coming of this technology, which can mean a change in the conventional methods of mold making, because, in addition to inserts, molds are already being manufactured with use of AM, however, in the application of additive manufacturing it is essential that the process used ensures that the parts are free from defects or porosity. This study also showed that this technology will significantly affect the concepts of new projects, and will result in disruptive changes in conventional methods.



Citação (APA): Feriotti, M. A., Marcelino, D. de M., Pohlmann, M. N., Martino, J., Neto, & Rosa, J. L. (2021). Aplicações da manufatura aditiva e impressão 3d na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(3), 199-218.

## INTRODUÇÃO

Há um crescente corpo de literatura que reconhece que a manufatura aditiva pode desempenhar um papel importante na atual produção convencional de moldes para injeção de termoplásticos. O setor vive hoje um momento de diversos avanços tecnológicos e os moldes em aço podem, em alguns casos, ser incorporados ou até substituídos pelo processo de impressão em 3D (Fernandes *et al.*, 2014).

A impressão 3D é uma tecnologia disruptiva que transformará atuais modelos de negócios. Com o avanço desta tecnologia o setor poderá sofrer mudanças significativas nos métodos convencionais de fabricação de moldes de injeção (Pegas, 2017).

Porém, os custos de fabricação deste processo da MA ainda se apresentam elevados, particularmente em função dos altos preços dos equipamentos e das matérias primas utilizadas na impressão 3D de metal (Huang *et al.*, 2017).

Neste contexto, este trabalho pretende explorar os tipos e aplicações da manufatura aditiva de metais e a impressão 3D, expor não só a flexibilidade na geometria do projeto, mas um dos maiores desafios é contribuir na solução de minimizar o problema do alto custo desta tecnologia, por exemplo, apresentando a sua aplicação de forma híbrida na fabricação de insertos de moldes para injeção de termoplásticos.

O foco neste trabalho se restringe à área da aplicação desta tecnologia na ferramentaria convencional de produção de moldes para injeção de termoplásticos no Brasil.

A avaliação da aplicação da impressão 3D na produção convencional de moldes, foi feita por meio de um estudo de caso junto a uma empresa do setor denominada “Alfa” estabelecida há 30 anos atuando na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos para produtos aplicados em vários setores da indústria. Este estudo foi embasado em uma pesquisa bibliográfica, realizada por meio das plataformas eletrônicas onde o período foi delimitado de 2010 a 2020 e as palavras-chave foram “Manufatura aditiva” e “Moldes de injeção”.

Este trabalho tem como objetivo principal analisar a aplicação da manufatura aditiva na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos. Para alcançar esse resultado, buscou-se apresentar essa tecnologia e apontar suas aplicações na fabricação de moldes.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Atualmente, as ferramentarias estão cada vez mais pressionadas a buscar alternativas para produzir moldes eficientes de forma mais rápida, precisa e com um menor custo. Um dos fatores para a tecnologia da manufatura aditiva evoluir neste segmento é o desenvolvimento de materiais com características dos aços ferramenta, utilizados principalmente na concepção de insertos para moldes de injeção de polímeros (Peças *et al.*, 2019).

Apesar da impressão 3D já existir há três décadas, esta só ganhou a atenção das grandes empresas e da academia nos últimos anos com o avanço tecnológico recente (Pegas, 2017).

O atual mercado de impressão 3D precisa de uma solução em que alto desempenho encontre baixo custo. Os pesquisadores já identificaram esta demanda e estão tentando resolver com



Citação (APA): Feriotti, M. A., Marcelino, D. de M., Pohlmann, M. N., Martino, J., Neto, & Rosa, J. L. (2021). Aplicações da manufatura aditiva e impressão 3d na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(3), 199-218.

pelo menos dois metais baseados nas tecnologias da manufatura aditiva em desenvolvimento (Torabi *et al.*, 2014).

Vários estudos têm se concentrado na porosidade de peças no processo de manufatura aditiva, e os níveis de porosidade podem variar consideravelmente dependendo do sistema e dos parâmetros usados (Plessis *et al.*, 2016).

A manufatura aditiva de materiais metálicos vem, na atualidade, apresentando avanços tecnológicos constantes em seu desenvolvimento e sua aplicação. Ampliando a viabilidade de sua utilização de forma econômica em diversos mercados, incluindo este segmento industrial de manufatura de moldes e matrizes (Junior & Costa, 2019).

### **Manufatura Aditiva (MA) e a Impressão 3D**

A manufatura aditiva e a impressão 3D necessitam de um modelo em três dimensões desenvolvido em um software que o suporte. Então, este modelo será carregado em outro software, desenvolvido especificamente para a impressora, onde será fatiado em várias camadas. O processo consiste na impressão dessas camadas adicionando material de baixo para cima, de forma que essas minúsculas camadas se unem e formam um objeto sólido.

O processo de manufatura aditiva, também conhecido popularmente como processo de impressão 3D, pode ser descrito, como um processo de fabricação baseado na adição e adesão de materiais em forma de camadas, orientadas através de informações de uma representação geométrica computacional 3D (Junior & Costa, 2019).

Existem diversas técnicas desenvolvidas para a MA e outras ainda em desenvolvimento com diferentes funcionalidades, isso é possível devido às variadas formas de impressão.

Mundialmente, existem diferentes tecnologias envolvendo a manufatura aditiva. Estas tecnologias se diferenciam em função do material e do processo utilizado no equipamento. Assim em 2010, a ASTM normatizou e classificou os processos de manufatura aditiva[...] (Junior & Costa, 2019).

O processo da manufatura aditiva enfrenta alguns desafios com relação à velocidade da impressão e o alto custo em função da tecnologia utilizada.

[...] as máquinas de manufatura aditiva industrial (AM) oferecem uma variedade de materiais, incluindo metais de alto desempenho, com peças impressas capazes de lidar com aplicações industriais. Infelizmente, essas máquinas têm um custo elevado (Torabi *et al.*, 2014).

Outro fator a ser observado nessa tecnologia são os níveis de porosidade, isso pode comprometer a sua aplicação em alguns casos, como por exemplo nos insertos de moldes, pois estes necessitam superfícies polidas e não podem sofrer infiltrações no circuito de refrigeração. Estudos apontaram que o direcionamento no processo da impressão 3D tem influência na geração de defeitos de porosidade, e indicaram, para os projetistas de moldes, os cuidados a serem tomados no posicionamento ideal dos modelos matemáticos 3D nesse processo (Plessis *et al.*, 2016).



Citação (APA): Feriotti, M. A., Marcelino, D. de M., Pohlmann, M. N., Martino, J., Neto, & Rosa, J. L. (2021). Aplicações da manufatura aditiva e impressão 3d na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(3), 199-218.

### Tipos de Impressão 3D

O conceito de manufatura aditiva tridimensional se caracteriza por produtos detalhados com profundidade e volume. No entanto, a mesma peça pode ser feita em diversas vertentes da impressão 3D (Fernandes *et al.*, 2014).

Um grupo de trabalho foi criado pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*) para criar a norma F42 que formula um conjunto de diretivas que classificam a gama de processos aditivos em sete categorias:

- *VAT Photopolymerisation* (Fotopolimerização)
- *Material Jetting* (Impressão por Jato de Material)
- *Binder Jetting* (Impressão 3D de Aglomerante)
- *Material Extrusion* (Deposição de Material Fundido)
- *Power Bed Fusion* (Fusão em camada de pó)
- *Sheet Lamination* (Laminação de Folhas)
- *Directed Energy Deposition* (Deposição direta de energia)

Destas categorias apresentadas, quatro delas podem processar metais. Na tabela 1 são apresentadas as tecnologias usadas no processamento assim como os materiais normalmente usados.

**Tabela 1.** Processos aditivos que processam metais

| Categorias                    | Processos              | Materiais              |
|-------------------------------|------------------------|------------------------|
| Impressão 3D de aglomerante   | Metal 3D Print         | Aço inoxidável         |
| Deposição de material fundido | FDM                    | <i>Feedstocks</i>      |
| Fusão em camada de pó         | SLM                    | Aço inoxidável         |
|                               |                        | Aço ferramenta         |
|                               | EBM                    | Ligas de alumínio      |
|                               |                        | Ligas de titânio       |
| EBM                           | Ligas de cromo-cobalto |                        |
|                               | Ligas de níquel        |                        |
| Deposição direta de energia   | LENS                   | Ligas de titânio       |
|                               |                        | Ligas de cromo-cobalto |
|                               | DMD                    | Ligas de titânio       |
|                               |                        | Ligas de níquel        |

Fonte: Adaptado de Reis (2017).

### IMPRESSÃO 3D DE AGLOMERANTE (*METAL 3D PRINT*)

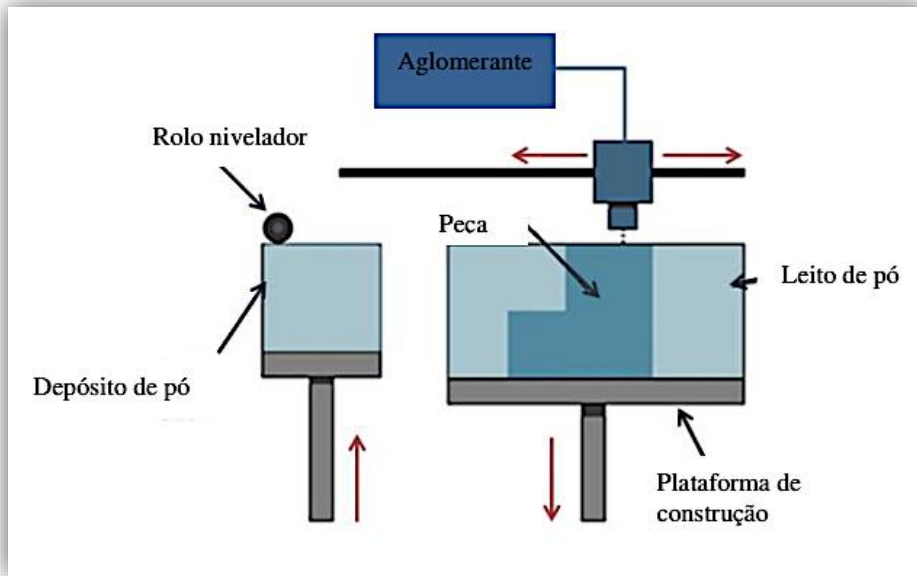
A impressão 3D de aglomerante (Figura 1) é um processo que utiliza dois materiais, o pó de aço e uma resina com função aglomerante e requer um segundo passo que é um tratamento térmico no forno para a remoção da resina. No seu lugar é inserido por capilaridade outra liga metálica para aumentar sua resistência mecânica e dureza.



Citação (APA): Feriotti, M. A., Marcelino, D. de M., Pohlmann, M. N., Martino, J., Neto, & Rosa, J. L. (2021). Aplicações da manufatura aditiva e impressão 3d na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(3), 199-218.

O processo de jato de aglomerante utiliza dois materiais, o pó e uma resina aglomerante. O material de construção é o pó e o aglomerante atua como um adesivo entre as camadas de pó da peça.[...] de impressão, que deposita seletivamente o aglomerante nas secções da peça, sobre uma camada de pó metálico e o processo repete-se sucessivamente, até se obter a geometria pretendida. A geometria que se retira da plataforma do processo não é final, sendo necessário remover o aglomerante e proceder à sinterização do pó metálico (Reis, 2017).

**Figura 1.** Princípio do funcionamento impressão 3D de aglomerante

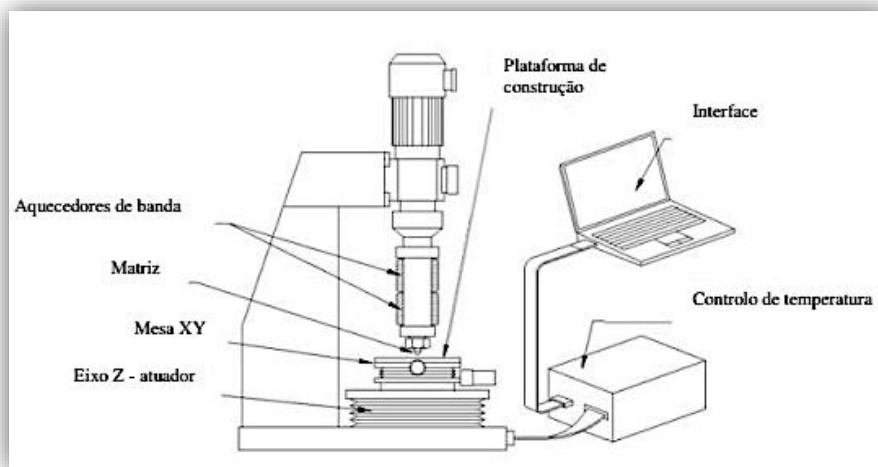


Fonte: Reis (2017).

### Deposição por Material Fundido (*Fused Deposition Modeling – FDM*)

A deposição de metais (FDM) é uma técnica desenvolvida para produzir componentes metálicos (Figura 2) com base na extrusão de misturas de metal com um ligante polimérico (*feedstocks*) para formar, camada por camada, objetos tridimensionais (Reis, 2017).

**Figura 2.** Princípio de funcionamento de impressão 3D (FDM)



Fonte: Reis (2017).





Citação (APA): Feriotti, M. A., Marcelino, D. de M., Pohlmann, M. N., Martino, J., Neto, & Rosa, J. L. (2021). Aplicações da manufatura aditiva e impressão 3d na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(3), 199-218.

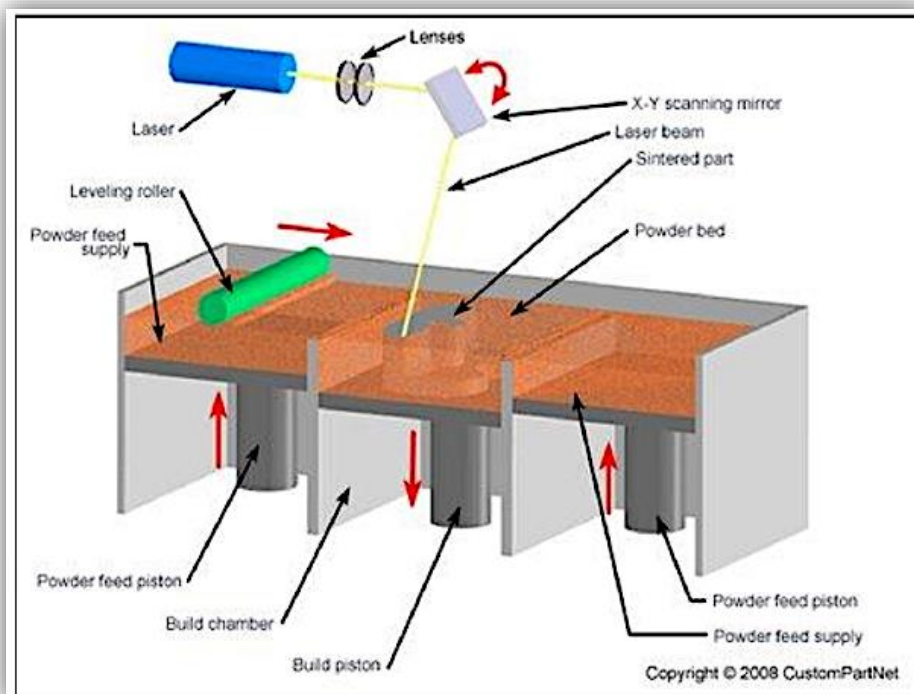
A mistura deve conter um elevado teor de pó metálico para evitar a contração excessiva nos tratamentos térmicos, como a remoção de ligante e a sinterização, sem comprometer as propriedades reológicas adequadas durante o processo de extrusão.

### SINTERIZAÇÃO SELETIVA A LASER (*SELECTIVE LASER SINTERING – SLS*)

Este método nasce da fundição de pequenas partículas em pó abrindo um leque de possibilidades de matéria-prima. Em suma, é espalhada uma camada do material em uma superfície onde um laser funde suas partículas e forma uma camada, logo após outra lâmina de pó é depositada em cima e o ciclo se repete até que se obtenha o sólido desejado.

A Sinterização seletiva a laser (SLS) é usada para plástico ou metal, um laser é usado como fonte de calor e os produtos resultantes ainda são parcialmente porosos, conforme princípio de funcionamento representado na figura 3 (Fernandes *et al.*, 2014).

**Figura 3.** Princípio de funcionamento de Impressão SLS



Fonte: Fernandes *et al.* (2014).

### DEPOSIÇÃO DIRETA DE ENERGIA (LENS)

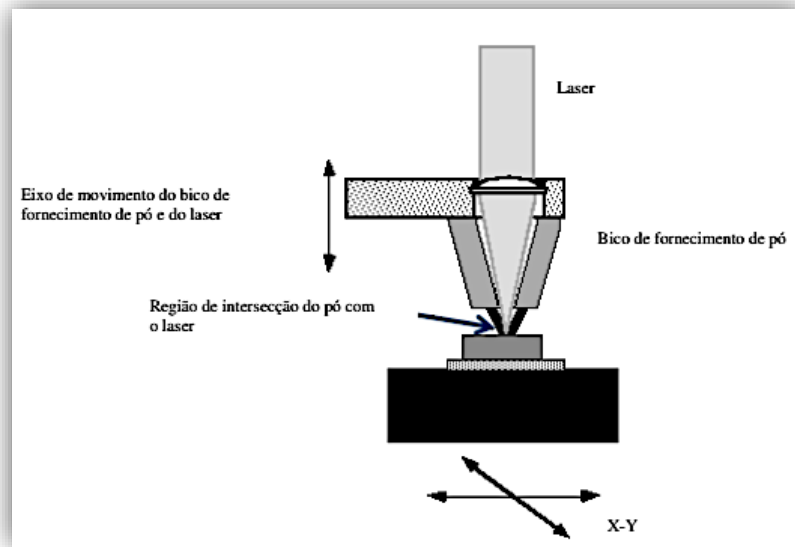
O processo de deposição direta de energia (LENS<sup>®</sup>) possui algumas similaridades com o processo SLM, no que concerne à capacidade de produzir protótipos de metal denso, com boas propriedades metalúrgicas e sob velocidades razoáveis de construção (Reis, 2017).

As partículas metálicas são inseridas através de um feixe laser focalizado que funde as partículas de metal sobre um substrato (Figura 4).



Citação (APA): Feriotti, M. A., Marcelino, D. de M., Pohlmann, M. N., Martino, J., Neto, & Rosa, J. L. (2021). Aplicações da manufatura aditiva e impressão 3d na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(3), 199-218.

**Figura 4.**Princípio do funcionamento LENS



Fonte: Reis (2017).

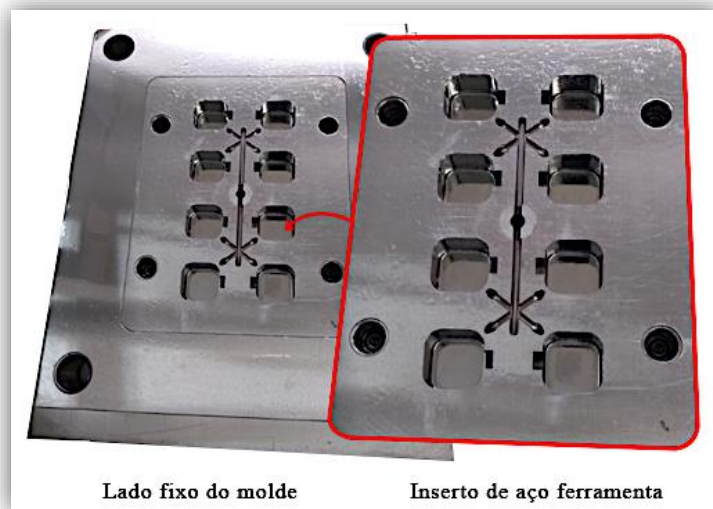
#### APLICAÇÃO NA FERRAMENTARIA DE MOLDES PARA TERMOPLÁSTICOS

A ferramentaria é o início da produção de praticamente todos os produtos que existem no mundo (Ferrari, 2011).

Um molde para injeção de termoplásticos é uma ferramenta mecânica, que, quando acoplada a uma máquina de injeção de termoplásticos, permite a produção de peças plásticas, sendo estas o produto que se pretende obter (Carreira, 2020).

No projeto de um molde de injeção, em muitos casos as cavidades necessitam possuir uma temperabilidade elevada, portanto, são previstos insertos nessas regiões utilizando o aço ferramenta e o tratamento térmico indicado em função da matéria prima a ser injetada (Figura 5).

**Figura 5.** Lado fixo do molde para injeção de termoplástico e o inserto de aço



Fonte: Autores

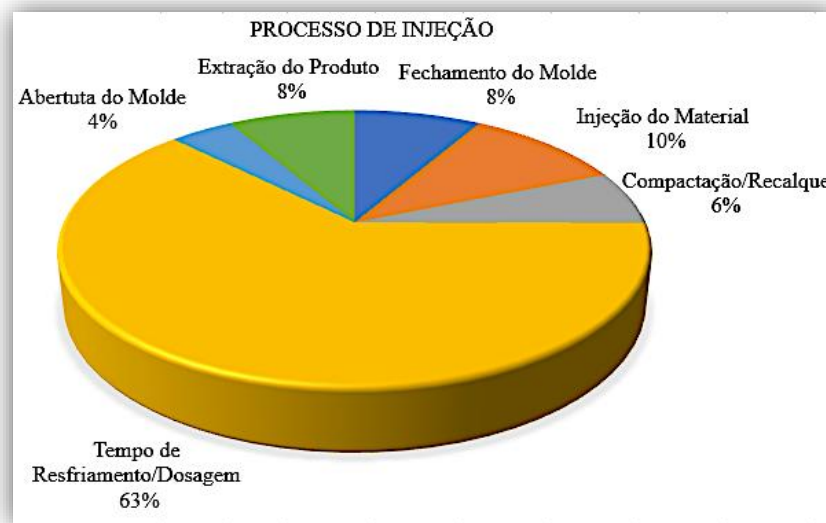


Citação (APA): Feriotti, M. A., Marcelino, D. de M., Pohlmann, M. N., Martino, J., Neto, & Rosa, J. L. (2021). Aplicações da manufatura aditiva e impressão 3d na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(3), 199-218.

A utilização do processo de manufatura aditiva em insertos é uma realidade aplicável, que pode ser considerada no projeto e fabricação de moldes ou partes de moldes plásticos (Junior & Costa, 2019).

Para obtenção de peças injetadas de boa qualidade e com ciclos produtivos eficientes, são envolvidos, além da máquina injetora, um projeto de molde que contemple sistemas de alimentação, extração e refrigeração eficientes. Neste contexto a etapa de refrigeração, normalmente, representa em média cerca de 60 a 70% do tempo total de um ciclo do processo de injeção, como representado na figura 6 (Junior & Costa, 2019).

**Figura 6.** Gráfico representativo da média das etapas do processo de injeção



Fonte: Autores, baseado em Junior e Costa (2019).

A manufatura aditiva permite a criação de geometrias dos canais de refrigeração que eram complexas para o método de fabricação convencional, com isso é possível reduzir o ciclo de injeção aumentando a produtividade e proporcionando melhorias no funcionamento do molde (Wu & Tovar, 2018).

[...] uma das razões para a utilização das tecnologias de fabrico aditivo reside na possibilidade de gerar canais conformados para aquecimento e arrefecimento diretamente dentro da cavidade ou dos insertos do molde. As transferências de calor permitem, por um lado, reduzir o tempo de aquecimento e arrefecimento do molde, com implicações no tempo total do ciclo de injeção e, por outro, uniformizar o perfil térmico do molde, eliminando o sub ou sobreaquecimento de zonas moldantes não passíveis de gestão térmica com as soluções convencionais de furação dos canais do sistema de controlo de temperatura, melhorando assim a qualidade da peça moldada (Reis, 2017).

Em muitas situações é possível utilizar moldes híbridos com insertos impressos na manufatura aditiva para reduzir tempos de processo. Ela acelera o lançamento do produto.





Citação (APA): Feriotti, M. A., Marcelino, D. de M., Pohlmann, M. N., Martino, J., Neto, & Rosa, J. L. (2021). Aplicações da manufatura aditiva e impressão 3d na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(3), 199-218.

Outro motivo que leva a indústria dos moldes a utilizar o fabrico aditivo está relacionado com os prazos de entrega, pois como o processo permite uma otimização das condições de processamento, com moldações validadas nos primeiros ensaios do molde, evitam-se ajustes que causam atrasos no prazo de entrega do molde ao cliente (Fidelis, 2015 apud Reis, 2017).

Os processos de fabricação rápida proporcionam às empresas uma série de benefícios exclusivos em uma ampla gama de áreas, incluindo custos operacionais e ganhos de eficiência, além de inovação de produtos e redução do impacto ambiental ((Huang *et al.*, 2017).

A manufatura aditiva está sendo aplicada na ferramentaria de moldes de injeção na fabricação de partes internas, podendo ser utilizada para acelerar o processo de fabricação ((Wu *et al.*, 2017).

O processo de fabricação por impressão 3D de metais pode gerar defeitos nas peças, como por exemplo, a porosidade, que traz prejuízo na sua aplicação em moldes e insertos.

Vários estudos têm se concentrado na porosidade de peças no processo de manufatura aditiva, e os níveis de porosidade podem variar consideravelmente dependendo do sistema e dos parâmetros usados. Sabe-se que dois principais tipos de porosidade ocorrem. Defeitos de formato irregular são por falta de fusão e, em contraste, a porosidade de formato esférica gerada pelo aprisionamento de gás (Plessis *et al.*, 2016).

## MOLDES IMPRESSOS EM PLÁSTICO

Para a produção de pequenas séries para a validação de projetos ou nos órgãos reguladores, a impressão de moldes em plástico é uma alternativa que traz como benefícios a redução de custos e do tempo de fabricação comparados aos métodos convencionais.

Em vez de desembolsar altas somas e muito tempo produzindo moldes em aço para a produção de pequenas séries de componentes ou produtos, os clientes das injetoras Arburg já podem utilizar moldes manufaturados nas impressoras 3D da Stratasys, minimizando custos e agilizando o lançamento do produto. [...] “As partes internas dos moldes impressos em nossas impressoras são idênticas às partes internas dos moldes de aço, e elas podem aceitar, por meio da injeção de plástico, a maioria dos materiais amplamente usados no setor”. Os materiais incluem polipropileno, elastômeros termoplásticos, poliacetal (POM) e ABS, e assim por diante. (Fernandes *et al.*, 2014).

Fabricantes de injetoras apostam na aceleração do processo e redução de custos da nova tecnologia, dos moldes produzidos nas impressoras 3D da Stratasys, conforme demonstrado na figura 7 (Fernandes *et al.*, 2014).



Citação (APA): Feriotti, M. A., Marcelino, D. de M., Pohlmann, M. N., Martino, J., Neto, & Rosa, J. L. (2021). Aplicações da manufatura aditiva e impressão 3d na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(3), 199-218.

**Figura 7.** Moldes gerados na impressora 3 D

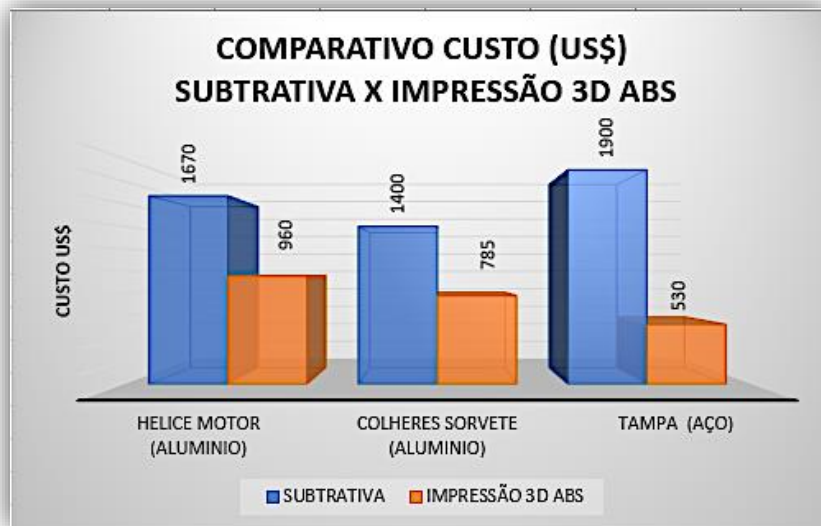


Fonte: CADxpert.com.br (2014) apud Fernandes *et al.* (2014).

Pode-se averiguar que, em situações em que é possível utilizar moldes impressos para estes materiais específicos, a manufatura aditiva tem se apresentado de forma eficiente.

Comparando com dois orçamentos solicitados aos desenvolvedores de ferramental, a economia é significativa, sendo 43% menor que o molde de alumínio e 72% mais barato que um molde de aço, conforme demonstrado na figura 8 (Fernandes *et al.*, 2014)

**Figura 8.** Gráfico comparativo de custo moldes manufatura subtrativa x impressos em 3D



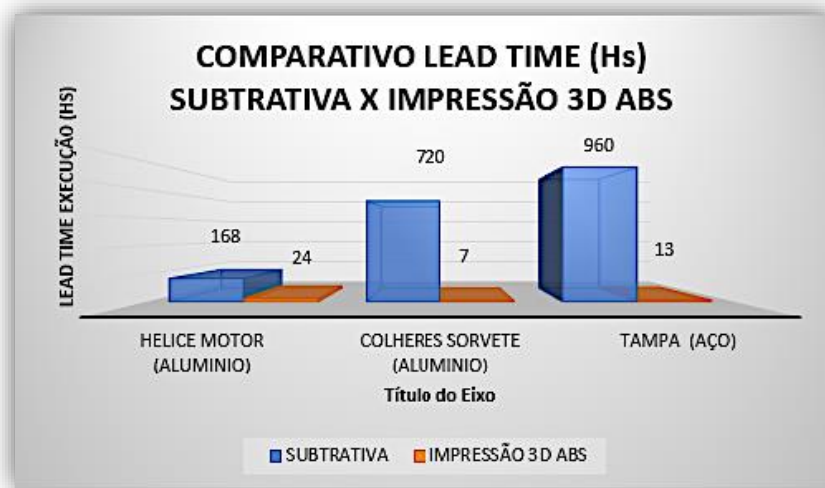
Fonte: Autores, baseado em Fernandes *et al.* (2014).

A impressão 3D, além de reduzir custos, acelera o lançamento do produto, conforme comparação do lead time de fabricação apresentada na Figura 9.



Citação (APA): Feriotti, M. A., Marcelino, D. de M., Pohlmann, M. N., Martino, J., Neto, & Rosa, J. L. (2021). Aplicações da manufatura aditiva e impressão 3d na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(3), 199-218.

**Figura 9.** Gráfico comparação de lead time moldes manufatura subtrativa x impressos em 3D



Fonte: Autores, baseado em Fernandes *et al.* (2014).

Uma das aplicações mais conhecidas de moldes impressos em 3D é na produção de pequenas séries de produtos para validação interna de projetos ou, então, validação de produtos que serão examinados por órgãos reguladores como a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), portanto, com uma impressora 3D não é mais necessário adquirir moldes para injeção de termoplásticos para fabricar um determinado produto, para submetê-lo a exames de validação basta imprimi-lo. Também há benefícios com a facilidade de personalização de pequenos lotes (Fernandes *et al.*, 2014).

Para processos em que é necessário fazer uso de moldes de aço, o molde impresso em plástico pode contribuir como protótipo para diminuir custos de projeto, já que é possível chegar ao molde final antes de se fabricá-lo em aço.

### MOLDES IMPRESSOS EM METAIS

A utilização de tecnologias de manufatura aditiva no setor dos moldes para injeção de termoplásticos tem sido cada vez mais recorrente desde os anos 90 com a criação do conceito da refrigeração com canais conformáveis (Sachs *et al.*, 1995, apud Carreira, 2020). Desde então, têm-se desenvolvido aplicações com este tipo de característica.

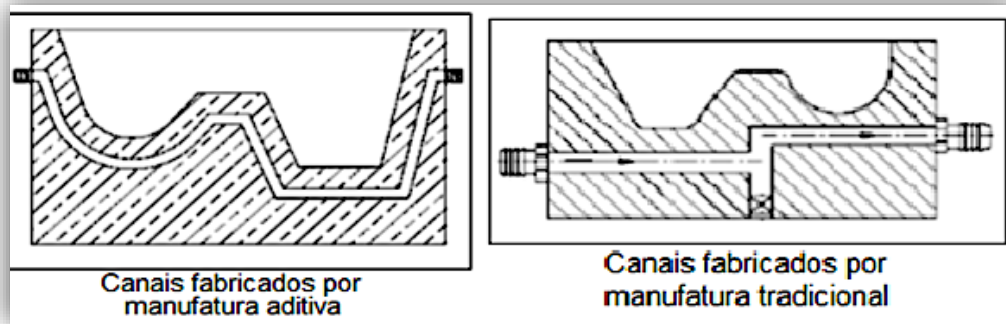
A obtenção de peças de boa qualidade com tempos de ciclos eficientes depende não somente da máquina injetora, mas também dos sistemas que a compõem, alimentação, refrigeração e extração. “Neste contexto a etapa de refrigeração normalmente representa cerca de 60 a 70% do tempo do ciclo de injeção” (Junior & Costa, 2019). Na Figura 10, é apresentado um desenho técnico de um molde e os canais de refrigeração.

A tecnologia da manufatura aditiva vem como uma opção a permitir elevar as taxas de resfriamento do molde e reduzir a deformação do produto moldado, através da liberdade em criar geometrias complexas para os canais de resfriamento. Assim é possível adaptá-los aos contornos da superfície da peça fornecendo um resfriamento mais uniforme. (Junior & Costa, 2019).



Citação (APA): Feriotti, M. A., Marcelino, D. de M., Pohlmann, M. N., Martino, J., Neto, & Rosa, J. L. (2021). Aplicações da manufatura aditiva e impressão 3d na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(3), 199-218.

**Figura 10.** Comparativo canais de refrigeração MA versus manufatura tradicional



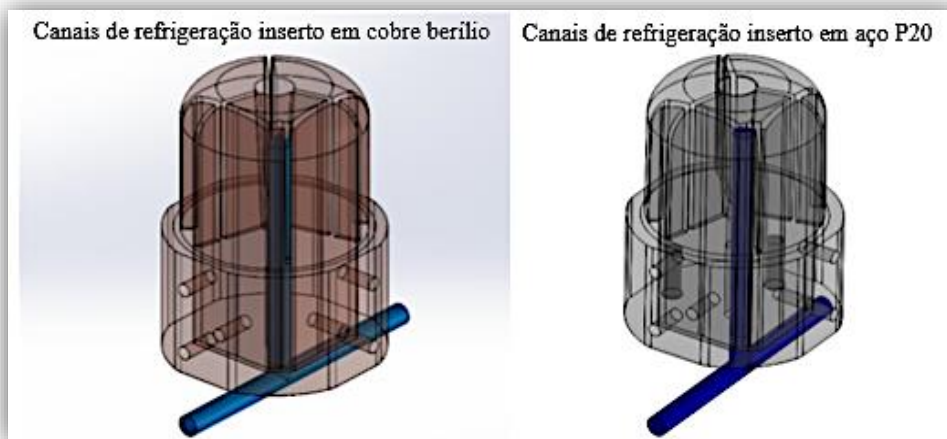
Fonte: Junior e Costa (2019).

Um comparativo entre insertos de metal impressos com insertos fabricados pelo método tradicional (manufatura subtrativa) apresenta canais de refrigeração melhorados e mais eficiente produzidos pela manufatura aditiva (Junior & Costa, 2019).

Uma sapata plástica foi a peça escolhida para mostrar esse comparativo. A matéria-prima é o polipropileno, com índice de fluidez 6.0 g/10min (ASTM), densidade de 0,895 g/cm<sup>3</sup> e peso aproximado deste produto de 62 gramas (Junior & Costa, 2019).

Fabricado através de métodos convencionais, ou seja, manufatura subtrativa, o inserto de aço AISI P20 e de cobre berílio, possui canais de refrigeração retilíneos e possui as mesmas características geométrica e elementos de fixação, conforme é mostrado na Figura 11.

**Figura 11.** Comparação das características dos inserto de cobre berílio e do aço P20



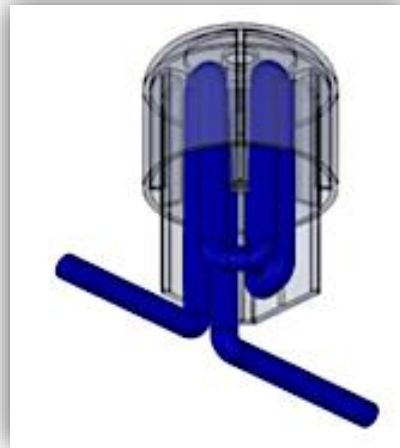
Fonte: Junior e Costa (2019).

Para a fabricação por impressão 3D, o aço Maranging M300 foi escolhido por possuir características muito semelhantes ao aço AISI P20. Por ser impresso, há uma liberdade de criação na geometria interna do molde possibilitando diversos posicionamentos para os canais de refrigeração sem se preocupar com elementos de fixação. Assim foi estudada uma geometria para estes canais, buscando uma otimização em sua configuração, a fim de realizar a maior e mais eficiente troca térmica possível para o projeto (Figura 12).



Citação (APA): Feriotti, M. A., Marcelino, D. de M., Pohlmann, M. N., Martino, J., Neto, & Rosa, J. L. (2021). Aplicações da manufatura aditiva e impressão 3d na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(3), 199-218.

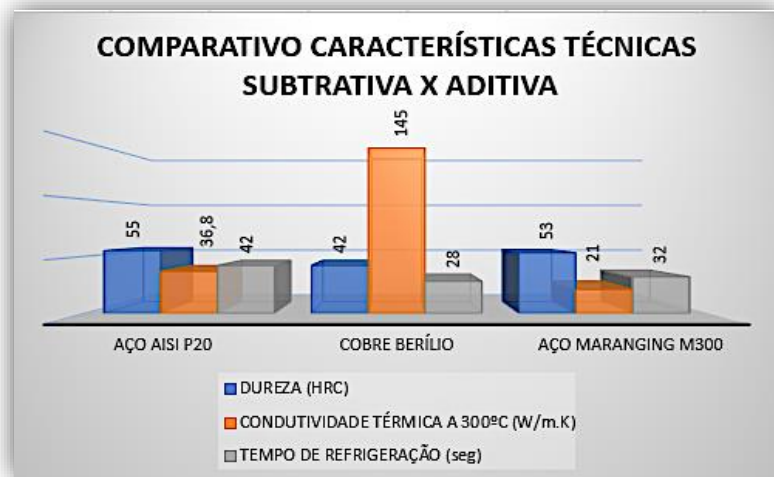
**Figura 12.** Canais de refrigeração inserto em aço Maraging M300



Fonte: Adaptado de Junior e Costa (2019).

A Figura 13 permite concluir que a condutividade térmica do cobre berílio é significativamente melhor que dos seus concorrentes, trazendo vantagem em sua aplicação. Já o aço Maraging M300 tem a menor condutividade térmica dentre os três, porém a geometria dos canais de refrigeração compensa no tempo do seu ciclo de refrigeração.

**Figura 13.** Gráfico comparativo das características da manufatura subtrativa x aditiva



Fonte: Autores, baseado em Junior e Costa (2019).

A manufatura aditiva do aço Maraging M300, com canais de refrigeração mais eficientes, demonstrou resultados promissores tendo em vista que o material utilizado possui a menor condutividade térmica dos três, mas apresentou um ganho de produtividade de 10 segundos em relação ao tempo de resfriamento comparado ao aço P20 e uma diferença de 4 segundos em relação ao cobre berílio.

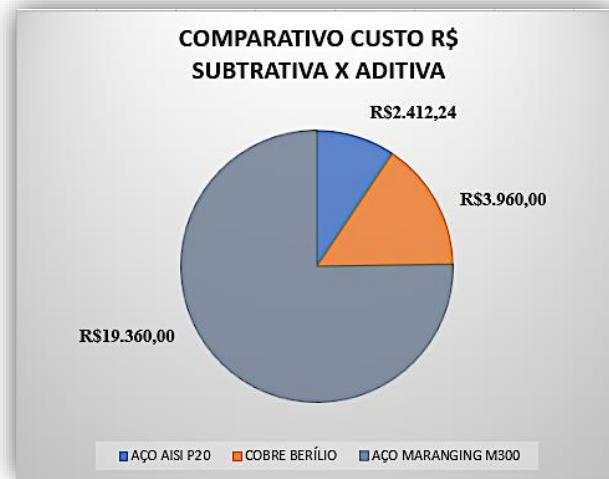
O fator econômico, conforme apresentado na Figura 14, é uma limitação da aplicação da manufatura aditiva em alguns casos, pois seu preço é formado com base no seu peso. Os materiais disponíveis no mercado têm seu custo equivalente à 9 vezes o valor dos outros materiais.





Citação (APA): Feriotti, M. A., Marcelino, D. de M., Pohlmann, M. N., Martino, J., Neto, & Rosa, J. L. (2021). Aplicações da manufatura aditiva e impressão 3d na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(3), 199-218.

**Figura 14.** Gráfico comparativo de custos da manufatura subtrativa x aditiva



Fonte: Autores, baseado em Junior e Costa (2019).

O custo desta tecnologia ainda se apresenta alto, porém, como aconteceu com a impressão de plástico, com a evolução da tecnologia, a customização, etc., este custo pode reduzir (Junior & Costa, 2019).

Com o objetivo de tornar a manufatura aditiva mais acessível, pesquisadores estão trabalhando no desenvolvimento de novas tecnologias de impressão 3D.

Dentro 2013, abriu-se um processo de origem baseado em soldagem a arco de gás metálico (GMAW) foi desenvolvido em *Michigan Technological University* para a fabricação de partes metálicas. O segundo processo, desenvolvido em a *University of Texas Arlington*, é conhecido como jato de metal líquido (LMJ)[...] LMJ envolve o jato de metal fundido em um processo semelhante à impressão a jato de tinta, onde gotículas derretidas individuais são ejetadas e conectadas umas às outras. Nenhum desses processos são ainda disponíveis comercialmente (Torabi *et al.*, 2014).

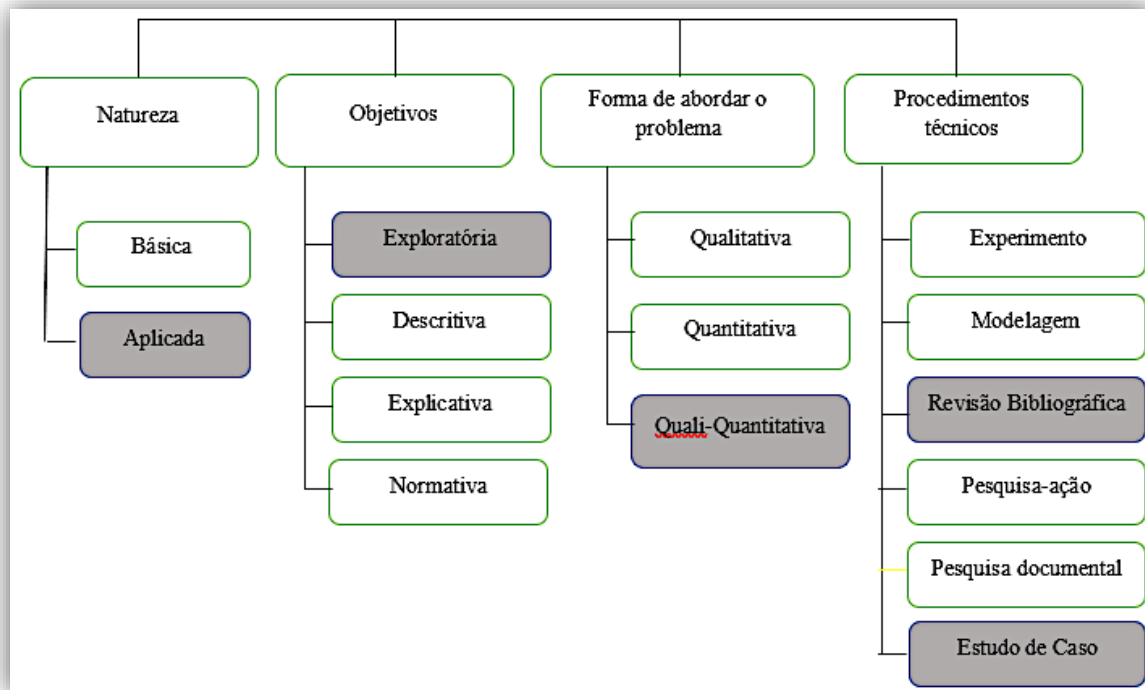
Uma das principais restrições é a falta de opções para o uso de materiais metálicos, pois existem sete tipos de processo de manufatura aditiva, porém, apenas quatro são utilizados metais (Cavaignac *et al.*, 2020).

## MÉTODO UTILIZADO

Para a realização deste trabalho, a definição do método, baseado em Gil (2002) e Knechtel (2014), se classifica de natureza aplicada, cujos objetivos são exploratórios, com forma de abordagem quali-quantitativa, e os procedimentos técnicos são de revisão bibliográfica a fim de embasar o estudo de caso. A estrutura é descrita no fluxograma apresentado na Figura 15.



**Figura 15.** Fluxograma do método de pesquisa do trabalho



Fonte: Autores, baseado em Knechtel, (2014) e Gil (2002).

A natureza aplicada, envolve conhecimento disponível e aplica o conhecimento visando utilidade econômica e social. Caracteriza-se como exploratória, pois proporcionou maior familiaridade com o problema ao torná-lo mais explícito levando-se a construção de hipótese (Gil, 2002). A forma de abordar o problema foi a modalidade de pesquisa quali-quantitativa “interpreta as informações quantitativas por meio de símbolos numéricos e os dados qualitativos mediante a observação, a interação participativa e a interpretação do discurso dos sujeitos (semântica)” (Knechtel, 2014).

Na pesquisa bibliográfica adotou-se material já elaborado constituído principalmente de artigos científicos livros e revistas, que abordam os temas pertinentes ao objeto desse estudo e sua problemática. Para essa pesquisa foi utilizado o buscador *Publish or Perish* e escolhidas nas plataformas eletrônicas publicações entre o período de 2010 a 2020. Com a finalidade de filtrar e selecionar os artigos encontrados na busca, partiu-se para a leitura do título e dos resumos de cada um, onde considerou-se na análise os trabalhos escritos em língua portuguesa e inglesa, que abordassem algum tipo de descrição relacionados as seguintes palavras-chave: “Manufatura aditiva” e “Moldes de injeção”.

Uma abordagem de estudo de caso foi usada para permitir a avaliação da aplicação prática das pesquisas bibliográficas apresentadas acima, para tanto, foi realizada pesquisa exploratória em cinco etapas:

- Definir empresa com uma ocorrência de experimento passada;
- Identificar o projeto de um molde híbrido com aplicação de inserto fabricado com MA de metal;
- Analisar o conceito MA utilizado na fabricação do inserto;



Citação (APA): Feriotti, M. A., Marcelino, D. de M., Pohlmann, M. N., Martino, J., Neto, J. L., & Rosa, J. L. (2021). Aplicações da manufatura aditiva e impressão 3d na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(3), 199-218.

- Levantar as informações e coletar os dados;
- Avaliar detalhadamente os dados coletados e analisar suas inferências acerca do objeto desse trabalho.

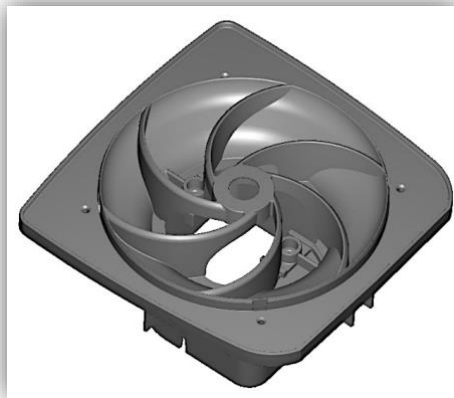
Vale ressaltar que a empresa Alfa objeto desse estudo utiliza em seus projetos a aplicação da MA, atua há 30 anos na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos para produtos aplicados em vários setores da indústria: automotiva, eletrodomésticos, brinquedos, médico-hospitalar, construção civil, utensílios domésticos, etc.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em estudos anteriores sobre a tecnologia da MA metálica, descobriu-se que diferentes variáveis estavam relacionadas a sua aplicação na fabricação de moldes. A partir das informações obtidas na literatura, foi possível dar início ao estudo de caso buscando uma compreensão extensiva e com mais objetividade, utilizando dados qualitativos, coletados a partir de eventos reais, com o objetivo de explicar e explorar o objeto desse trabalho inseridos em seu próprio contexto. Neste sentido foi selecionado o caso relatado abaixo:

A empresa “Alfa” desenvolveu o projeto e a construção do molde de injeção para um suporte do motor injetado em termofixo baquelite (Figura 16) a pedido de um fabricante de eletrodomésticos denominado “empresa A”.

**Figura 16.** Produto suporte do motor injetado em termofixo baquelite



Fonte: Autores

A empresa “Alfa” apresentou um cronograma com prazo total de 150 dias para entrega do molde. A “Empresa A” verificou que o prazo para os testes de validação, aprovação e certificação junto aos órgãos regulamentadores, como a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT e o Instituto Nacional de Metrologia – INMETRO seria de 60 dias.

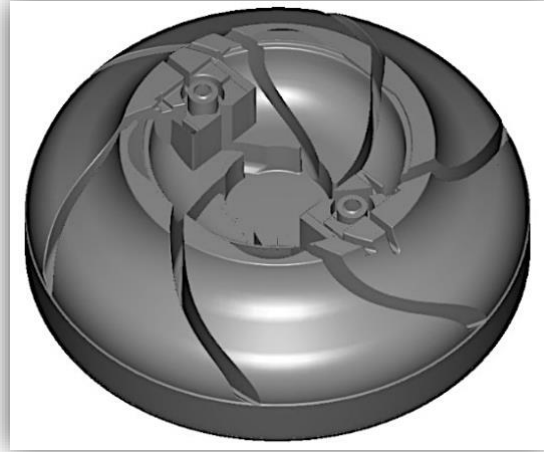
A “Empresa A”, buscou mitigar fases no cronograma do projeto para que algumas etapas ocorressem independentemente da conclusão de outras. Foi solicitada a injeção de 150 amostras 40 dias antes do prazo de entrega previsto, para execução dos testes de validação junto a ABNT e o INMETRO, com objetivo de obter a certificação juntamente com prazo da entrega do molde.



Citação (APA): Feriotti, M. A., Marcelino, D. de M., Pohlmann, M. N., Martino, J., Neto, & Rosa, J. L. (2021). Aplicações da manufatura aditiva e impressão 3d na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(3), 199-218.

A empresa “Alfa” apresentou proposta de cavidade híbrida utilizando inserto fabricado com tecnologia da MA metálica para substituir o postição usinado em aço AISI 1.2344 (Figura 17), com objetivo de acelerar o processo de fabricação.

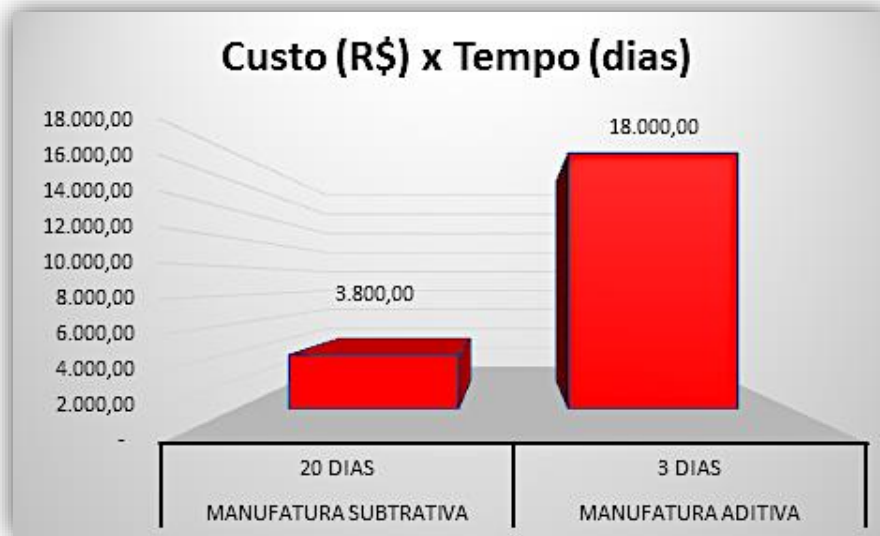
**Figura 17.** Postição usinado em aço AISI 1.2344



Fonte: Autores

Para a tomada de decisão, alguns critérios foram avaliados, o custo e o prazo (Figura 18).

**Figura 18.** Gráfico comparativo custo x tempo



Fonte: Autores

Outro critério avaliado foi a vida útil e a capacidade de produzir as 150 peças solicitadas, pois o termofixo baquelite é muito abrasivo no processo de injeção e não se tem informações de ensaios anteriores do processo de MA que possa ser utilizado para mensurar sua vida útil nessa aplicação específica.

A empresa “Alfa” se reuniu com a empresa especializada em impressão 3D metálica e foram avaliadas as condições necessárias para a aplicação do inserto no molde.



Citação (APA): Feriotti, M. A., Marcelino, D. de M., Pohlmann, M. N., Martino, J., Neto, & Rosa, J. L. (2021). Aplicações da manufatura aditiva e impressão 3d na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(3), 199-218.

Diante das condições para atender a quantidade e as características do processo de injeção, foi sugerido o processo *Metal 3D Print*, utilizando aço inoxidável e no processo de tratamento térmico foi feita a dopagem por capilaridade de bronze, substituindo o aglomerante.

Verificou-se a necessidade de melhoria da resistência a abrasão, com base em pesquisa elaborada sobre as características e propriedades da aplicação de tratamento superficial PVD (*Physical Vapor Deposition*), foi sugerido a aplicação de TiAlN (*Titanium Aluminium Nitride*) para contribuir na redução do coeficiente de abrasão aumentando a resistência ao desgaste (Tabela 2).

**Tabela 2.** Características e propriedades do nitreto de titânio alumínio, aplicado por PVD

|  |                    |
|--|--------------------|
| Microdureza (HV 0,005)                     | 3300               |
| Coefficiente de atrito contra o aço (seco) | 0,30 - 0,35        |
| Tensões interna da camada (Gpa)            | -2,0               |
| Temperatura máxima de trabalho (°C)        | 800                |
| Temperatura do processo PVD (°C)           | < 500              |
| Cor do revestimento                        | Violeta - Cinzento |

Fonte: Adaptado de Ohnuma *et al.* (2004).

O inserto foi fabricado e, após ser ajustado no molde, aplicou-se a camada de TiAlN, atendendo o prazo estipulado pela “Empresa A”, e foram injetadas 150 amostras.

Posteriormente, a “Empresa A” solicitou a injeção de mais 250 peças para testes funcionais e 300 peças para as adequações da sua linha de montagem. Foi observado que o inserto impresso resistiu à injeção de 700 peças com poucas avarias, ou seja, resistiu a 4 vezes a quantidade planejada.

Mais estudos, que levem em consideração essas variáveis, precisarão ser realizados para se avaliar com mais precisão a vida útil inserto metálico usado no molde.

O objetivo da aplicação da MA de forma híbrida nesse projeto, como meta de mitigar o prazo para a injeção do produto para que fosse submetido aos testes de validação junto aos órgãos certificadores foi alcançado.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os presentes resultados, estudos anteriores demonstraram que se pode considerar que, em determinadas situações, a impressão 3D já substitui a produção tradicional e tem um crescimento acelerado, conforme pesquisado nos artigos científicos citados na fundamentação teórica.

Foi averiguado nesse estudo, a possibilidade de imprimir moldes e suas partes alterando os métodos convencionais para um modelo híbrido. Isso também está de acordo com nossas observações anteriores, que mostraram que é possível buscar a harmonização entre as manufaturas subtrativa e aditiva, já que a impressão 3D não contempla todas as necessidades e pode atuar como uma alternativa na fabricação convencional de moldes.

A comparação dos achados com os de outros estudos confirma também que a manufatura aditiva tem algumas limitações com relação aos materiais metálicos e custo, porém, traz





Citação (APA): Feriotti, M. A., Marcelino, D. de M., Pohlmann, M. N., Martino, J., Neto, & Rosa, J. L. (2021). Aplicações da manufatura aditiva e impressão 3d na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(3), 199-218.

muitas vantagens relacionadas à liberdade de geometria, prazos de fabricação e redução dos resíduos gerados, quando comparados aos métodos convencionais da manufatura subtrativa, portanto projetos de moldes híbridos podem trazer grandes vantagens competitivas ao setor.

Inferiu-se que os resultados obtidos com o estudo de caso, corroboram os achados de uma grande parte dos trabalhos anteriores em que a utilização de insertos fabricados com a tecnologia MA, embora apresente custos maiores, se comparados com processo da manufatura subtrativa, podem ser utilizado como uma opção para acelerar os prazos de fabricação do molde, proporcionando ao cliente a condição de obter antecipadamente seu produto final nas condições exigidas para submeter aos testes de validação exigidos.

A investigação sobre os defeitos de porosidade na MA, mostrou que existem estudos que apontaram o direcionamento da impressão como a origem da geração desses defeitos e indicaram para os projetistas de moldes quais os cuidados a serem tomados para evitá-los.

Este trabalho também buscou contribuir para a disseminação da manufatura aditiva e sua utilização na fabricação de moldes considerando que essa tecnologia para esse fim ainda é pouco pesquisada. Entretanto ela vem apresentando avanços constantes em seu desenvolvimento e sua aplicação pode ser um fator competitivo para o setor.

Objetivando avançar na área da aplicação dessa tecnologia, são necessários estudos de alguns aspectos que deveriam ser alvos de trabalhos futuros como, por exemplo, aperfeiçoar parâmetros de produção para obter superfícies com melhor acabamento e tolerâncias dimensionais; reduzir as limitações relativas ao alto custo otimizando os processos de produção; estudar o comportamento e as propriedades dos novos materiais existentes no mercado comparando-os aos aços ferramenta.

## REFERÊNCIAS

Carreira, J. M. O. (2020). *Produção de componentes para moldes de injeção para termoplásticos por fabrico aditivo metálico*, Leiria, Portugal. Projeto Mestrado em Engenharia Mecânica - Produção Industrial, IPL.

Cavaignac, A. L. de O., Silva, L. H. V., Sousa, R., Jr., Silva, E. M. L. E., & Lima, R. J. C. (2020). FMEA, CFD e FEA para otimização do desenvolvimento de produtos com prototipagem 3d em peça mecânica automotiva *Aftermarket - Parte A. Brazilian Journal of Production Engineering - BJPE*, 6(5), 74-97. Recuperado de <https://periodicos.ufes.br/bjpe/article/view/30396>

Fernandes, A. de F., *et al.* (2014). *Supply chain e o impacto da impressora 3D*, São Paulo, SP.

Gil, A. C. (2002). *Como elaborar projetos de pesquisa*, 4ª Edição, Editora Atlas, São Paulo.

Huang, R., Riddle, M., Graziano, D., Das, S., Nimbalkar, S., Cresko, J., & Masanet, E. (2017). Environmental and economic implications of distributed additive manufacturing: The case of injection mold tooling. *Journal of Industrial Ecology*, 21(S1), S130-S143. <https://doi.org/10.1111/jiec.12641>

Junior, G. B. M. & Costa, C. A.(2019). Manufatura aditiva aplicada na fabricação de insertos para moldes de injeção termoplásticos. *Scientia Cum Indústria*, 7(2), 76-82. <http://dx.doi.org/10.18226/23185279.v7iss2p76>



Citação (APA): Feriotti, M. A., Marcelino, D. de M., Pohlmann, M. N., Martino, J., Neto, & Rosa, J. L. (2021). Aplicações da manufatura aditiva e impressão 3d na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(3), 199-218.

Knechtel, M., do R. (2014). *Metodologia da pesquisa em educação: uma abordagem teórico-prática dialogada*, 1ª Edição, Livraria Inter Saberes, Curitiba, Paraná.

Ohnuma, H., Nihira, N., Mitsuo, A., Toyoda, K., Kubota, K., & Aizawa, T. (2004). Effects of aluminum concentration on friction and wear properties of titanium aluminum nitride films. *Surface and Coatings Technology*, 177-178, 623-626. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(03\)00936-8](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00936-8)

Peças, P., Ribeiro, I., Henriques, E., & Raposo, A. (2019). Additive Manufacturing in Injection Molds—Life Cycle Engineering for Technology Selection. *Advanced Applications in Manufacturing Engineering*, 105-139. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102414-0.00004-5>

Pegas, P. H. (2017). *Simulação baseada em agentes para uma cadeia de suprimentos com impressão 3D: Uma análise comparativa utilizando AnyLogic..* 59p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa.

Plessis, A. du, Roux, S. G., le, Booyesen, G., & Els, J. (2016). Directionality of cavities and porosity formation in powder-bed laser additive manufacturing of metal components investigated using X-Ray Tomography, *3D printing and additive manufacturing*, 3(1),48-55. <https://doi.org/10.1089/3dp.2015.0034>

Reis, N. C. R. (2017). *Aplicabilidade do fabrico aditivo na indústria dos moldes de injeção, Leiria, Portugal*, Projeto Mestrado em Engenharia Mecânica - Produção Industrial, IPL.

Torabi, P., Petros, M., & Khoshnevis, B. (2014). Selective inhibition sintering: the process for consumer metal additive manufacturing. *3D printing and additive manufacturing*, 1(3), 152-155. <https://doi.org/10.1089/3dp.2014.0017>

Wu, T., & Tovar, A. "Design for Additive Manufacturing of Conformal Cooling Channels Using Thermal-Fluid Topology Optimization and Application in Injection Molds." *Proceedings of the ASME 2018 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. Volume 2B: 44th Design Automation Conference. Quebec City, Quebec, Canada. August 26–29, 2018. V02BT03A007. ASME. <https://doi.org/10.1115/DETC2018-85511>

Wu, T., Jahan, S., Zhang, Y., Zhang, J., Elmounayri, H., & Tovar, A. (2017). Design optimization of plastic injection tooling for additive manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 10, 923-934. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.082>

