

Manufatura Aditiva em Metais para Moldes de Injeção sob a Perspectiva da Sustentabilidade: Benefícios e Desafios

Metal Additive Manufacturing for Injection Molds from a Sustainability Perspective: Benefits and Challenges

Eduardo Lopes Pereira Lima, Graduado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, CEFET-MG.

eduardolopesplima@hotmail.com

Maria Julia Ribeiro Gomes, Graduanda em Design do Departamento de Artes e Design, Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF.

mariajulia.gomes@estudante.ufjf.br

Ana Clara Souto de Souza, Graduanda em Design do Departamento de Artes e Design, Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF.

anaclara.souto@estudante.ufjf.br

Lia Paletta Benatti, Professora Pesquisadora do Departamento de Artes e Design, Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF.

lia.paletta@ufjf.br

Artur Caron Mottin, Professor Pesquisador do PPGEM - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, CEFET-MG.

Artur.mottin@cefetmg.br

Número da sessão temática da submissão – [03]

Resumo

O presente trabalho teve como objetivo refletir sobre a manufatura aditiva em metais para moldes de injeção sob o viés da sustentabilidade. A partir de uma revisão narrativa da literatura, foram realizadas pesquisas na base Science Direct utilizando o protocolo “*metal additive manufacturing injection mold*”, resultando na seleção de quatorze artigos publicados entre 2019 e 2025. A análise evidenciou benefícios referentes à redução do ciclo de injeção, maior eficiência e potencial para estruturas leves. Desafios também foram identificados, principalmente no que relaciona-se ao custo inicial, limitações técnicas e necessidade de qualificação profissional. A partir da análise, conclui-se a potencialidade da impressão 3D em metais na indústria de moldagem, bem como a essencialidade de pesquisas científicas e práticas interdisciplinares em engenharia e design para a consolidação sustentável da manufatura aditiva na fabricação de moldes de injeção.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva; Moldes de Injeção; Sustentabilidade; Impressão 3D em Metais; Projeto Interdisciplinar.

Abstract

The present work aimed to reflect on metal additive manufacturing for injection molds from a sustainability perspective. Based on a narrative literature review, searches were carried out in the Science Direct database using the protocol “metal additive manufacturing injection mold,” resulting in the selection of fourteen articles published between 2019 and 2025. The analysis highlighted benefits related to the reduction of the injection cycle, greater efficiency, and potential for lightweight structures. Challenges were also identified, mainly concerning initial cost, technical limitations, and the need for professional qualification. From the analysis, it is concluded that metal 3D printing has potential in the molding industry, as well as the essential role of scientific research and interdisciplinary practices in engineering and design for the sustainable consolidation of additive manufacturing in the production of injection molds.

Keywords: Additive Manufacturing; Injection Molds; Sustainability; Metal 3D Printing; Interdisciplinary Design.

1. Introdução

Na atualidade, a injeção é um dos processos de transformação de materiais poliméricos de maior importância nos grandes mercados (Garcia, 2009). A popularidade das injetoras fundamentou-se, entre outros fatores, no sucesso do uso de moldes em processos industriais. Silva (2019b) apresenta a primordialidade do molde termoplástico pela perspectiva da capacidade da ferramenta em fabricar componentes complexos com alta repetibilidade, precisão e baixo custo, quando comparado a outros processos. A capacidade de produção em larga escala de peças padronizadas com menor custo possibilitou uma solução para as demandas de uma sociedade caracterizada pelo consumo em massa e, por consequência, estabeleceu o domínio dos moldes de aço na indústria de polímeros.

Os moldes são componentes cruciais para o funcionamento do processo de injeção, com influência em sua eficiência e potencialidade. Garcia (2009) explica que a injeção de peças plásticas envolve diferentes procedimentos que configuram o Ciclo de Injeção, composto por 7 etapas que se sucedem na seguinte ordem: (i) fechamento; (ii) injeção; (iii) pressurização; (iv) recalque; (v) resfriamento; (vi) abertura; e (vii) extração. Cada mecanismo ocupa um espaço de tempo e uma função que afeta diretamente a qualidade da peça e a duração do ciclo. Garcia (2009) ainda enfatiza que a otimização da produção é essencial para a competitividade no mercado. Nesse contexto, estudos e propostas tecnológicas voltadas ao ciclo de injeção se tornam cada vez mais necessárias para garantir às indústrias processos otimizados e sustentáveis, que proporcionem melhores posições em um mercado acirrado. É nesse contexto em que discussões acerca da aplicação de novas técnicas de fabricação ganham força como alternativas para reinventar lógicas operacionais. Silva (2019a) correlaciona o surgimento da impressão 3D em metais como uma técnica poderosa na manufatura contemporânea a sua propriedade de personalização, alta precisão e redução do desperdício de material, características muitas vezes limitadas pelos recursos do procedimento tradicional.

Armstrong (2022) também destaca o crescimento da manufatura aditiva em metais ao relatar um aumento significativo da atenção científica. Em seu trabalho, Armstrong defende que a taxa de crescimento de interesse nessa tecnologia insinua o papel fundamental que esse processo pode exercer na transição para a próxima revolução industrial. Entretanto, o autor alerta para a necessidade de melhorias, com obstáculos técnicos ainda a serem superados.

É, portanto, em meio ao cenário descrito que o presente trabalho se propôs a refletir sobre a manufatura aditiva na construção de moldes para injeção à luz da demanda progressiva por sustentabilidade e otimização na sociedade contemporânea. Procurou-se, a partir dessa discussão, evidenciar os benefícios e obstáculos para a aplicação sustentável da impressão 3D em metais na indústria plástica. Por fim, destacou-se o papel que a pesquisa científica e o projeto do produto exercem na adaptação vitoriosa dessa tecnologia ao processo de moldagem.

2. Procedimentos Metodológicos

Este trabalho abordou sua análise a partir de uma revisão narrativa da literatura, caracterizada por um estudo temático, não sistemático, focado na produção de reflexões de natureza significativa (Fernandes; Vieira; Castelhana, 2023). Nesse sentido, foram conduzidas pesquisas acerca da impressão 3D em aço para a fabricação de moldes de injeção frente ao contexto de sustentabilidade na indústria termoplástica. A investigação e seleção de trabalhos ocorreram por meio do uso da base de documentos científicos Science Direct e das palavras “*Metal additive manufacturing injection mold*”.

Com a primeira etapa de busca, foram encontrados 11.346 trabalhos acadêmicos relacionados ao protocolo de investigação que, posteriormente, foram submetidos a um processo eliminatório com base em suas datas de publicação. Como critério inicial de exclusão assumiu-se pesquisas publicadas entre 2019 e 2025, com o resultado de 1.374 artigos elegíveis. Em seguida, foram aplicados critérios qualitativos de seleção, considerando a aderência ao tema da sustentabilidade — contemplando aspectos ambientais, econômicos e/ou sociais — e a relação direta com o projeto e desenvolvimento de produtos ou processos, especialmente no contexto da manufatura aditiva aplicada a moldes de injeção ou áreas correlatas passíveis de extrapolação técnica.

Foram incluídos estudos que apresentassem contribuições relevantes ao desempenho sustentável, como redução de tempo de ciclo, eficiência energética, otimização de materiais ou inovação em design de moldes. Também foram considerados artigos de revisão e estudos experimentais com rigor metodológico e dados consistentes. Por outro lado, foram excluídos trabalhos que não abordassem aspectos de sustentabilidade, que se restringissem a análises puramente técnicas sem relação direta ou indireta com o escopo da manufatura aditiva aplicada à ferramentaria. Adicionalmente, foram excluídos estudos redundantes, com baixa robustez metodológica ou com informações insuficientes para análise.

Finalizada as pesquisas, então, foram selecionados 14 textos para fundamentar este artigo. Após a análise dos trabalhos, foi elaborada uma discussão acerca da sustentabilidade de tecnologias aditivas na concepção de moldes impressos.

3. Resultados

Com base nos resultados, foi possível notar uma alta no estudo sobre a aplicação da impressão 3D na indústria de injeção. A abordagem dessa nova tecnologia também se mostrou diversificada, com diferentes obstáculos e ganhos acerca dos principais pilares da sustentabilidade, bem como proposições de moldes em diferentes materiais, como os polímeros. Ainda que as técnicas de manufatura aditiva à base de materiais poliméricos não estejam totalmente correlacionadas com o recorte temático do artigo, os estudos se apresentaram aptos, a partir de uma análise cautelosa frente à diferença dos processos, de promoverem conclusões que podem ser extrapoladas para os moldes impressos em metais. Nesse contexto, foram reunidos, no quadro 1, os artigos selecionados de forma arbitrária para compor o corpus do trabalho.

Quadro 1: Artigos escolhidos arbitrariamente.

Título	Autor (ano)	DOI
Aplicações da manufatura aditiva e impressão 3D na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos	Feriotti M.A. (2021)	10.22533/at.ed.70621191012
<i>Lightweight injection mold using additively manufactured Ti-6Al-4V lattice structures</i>	Park S.J. (2022)	10.1016/j.jmapro.2022.05.022
<i>Coupled injection moulding simulation-thermal and mechanical simulation method to analyse the operational behaviour of additively manufactured polymeric injection molds</i>	Krizsma et al. (2024)	10.1016/j.rineng.2024.102558
<i>An industry 4.0 framework for tooling production using metal additive manufacturing-based first-time-right smart manufacturing system</i>	Moshiri et al. (2020)	10.1016/j.procir.2020.04.151
<i>Towards temperature control measures for polymer additive injection molds</i>	Schuh G. (2020)	10.1016/j.procir.2020.03.050
<i>Quantitative sustainability assessment of metal additive manufacturing: a systematic review</i>	Pusateri et al. (2023)	10.1016/j.cirpj.2023.12.005

<i>An overview of modern metal additive manufacturing technology</i>	Armstrong M. (2022)	10.1016/j.jmapro.2022.10.060
<i>Superior fatigue endurance exempt from high processing cleanliness of Metal-Injection-Molded b Ti-Nb-Zr for bio-tolerant applications</i>	Xu P. (2021)	10.1016/j.matdes.2021.110141
<i>Effects of defects on mechanical properties in metal additive manufacturing: a review focusing on X-ray tomography insights</i>	Plessis A. D. (2020)	10.1016/j.matdes.2019.108385
<i>3D printed breathable mould steel: small micrometer-sized, interconnected pores by creatively introducing foaming agent to additive manufacturing</i>	Zeng G. H. (2019)	10.1016/j.matdes.2019.107693
<i>Sensorised metal AM injection mould tools for in-process monitoring of cooling performance with conventional and conformal cooling channel designs</i>	Kariminejad M. (2024)	10.1016/j.jmapro.2024.02.021
<i>Design and fabrication of conformal cooling channels in molds: review and progress updates</i>	Feng S. (2021)	10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121082
Manufatura aditiva aplicada na fabricação de insertos para moldes de injeção de termoplásticos	Junior & Costa (2019)	10.18226/23185279.v7iss2p7
<i>Large-scale additive manufacturing tooling for extrusion-compression molds</i>	Yeole P. (2021)	10.1016/j.addlet.2021.100007

Fonte: Os autores (2025)

4. Análises dos Resultados e Discussões

4.1. Tempo de refrigeração e seus benefícios ambientais

De acordo com Junior; Costa (2019), a refrigeração ocupa 60 a 70% do ciclo de injeção. A longa duração dessa etapa se dá, principalmente, devido às limitações geométricas dos canais de resfriamento de moldes tradicionais, confeccionados em manufatura subtrativa. A impressão 3D, em contrapartida, aplicada à indústria de injeção, possibilita uma maior flexibilidade na configuração desses dutos ao, ainda segundo Junior; Costa (2019), garantir que sejam configurados conforme os contornos da superfície do produto a ser injetado.

Ferioti (2021), em um estudo com base no trabalho de Junior; Costa (2019), averiguou a influência de canais de refrigeração conformais no tempo de resfriamento de um molde. Para o desenvolvimento das conclusões, um molde em manufatura aditiva produzido em aço Maraging M300 e dutos concordantes a peça a ser injetada foi comparado a um molde em manufatura subtrativa, feito com aço AISI P20 e dutos retilíneos. Mesmo com menor condutividade térmica do que o aço AISI P20, o molde impresso em Maraging M300 obteve um tempo de refrigeração de 32 segundos, enquanto o molde tradicional somou 42 segundos. Kariminejad (2024) realizou um experimento que também demonstrou a influência da impressão 3D em metais na otimização do ciclo de injeção. Em seu estudo, Kariminejad comparou a atuação de dois moldes em uma máquina de injeção, um produzido em manufatura subtrativa com canais lineares e outro produzido com canais conformais a partir do processo de Fusão Seletiva a Laser (SLM). Assim como os resultados de Ferioti (2021), a conclusão do trabalho demonstrou a queda do tempo de refrigeração com a implementação da manufatura aditiva: o molde impresso realizou o resfriamento em 11 segundos, enquanto o tradicional executou o mesmo processo em 24 segundos.

Nesse contexto, considerando a melhoria no desempenho térmico e seu impacto no processo como um todo, a redução do tempo de resfriamento contribui diretamente para a diminuição do ciclo de injeção e para a mitigação de deformações decorrentes de uma refrigeração inadequada. Os estudos analisados evidenciam, portanto, a capacidade da manufatura aditiva em promover a redução do tempo de produção por meio da otimização de processos e resultados (Feng, 2021). Esse ganho na janela produtiva implica efeitos diretos na redução dos custos operacionais, configurando-se como um avanço relevante sob a perspectiva da sustentabilidade econômica em processos industriais (Pusateri *et al.*, 2023).

Além disso, a diminuição do tempo de ciclo está associada à redução do consumo energético das máquinas injetoras e dos sistemas de refrigeração, resultando em menor demanda por recursos energéticos e, conseqüentemente, na redução de emissões de gases de efeito estufa ao longo do processo produtivo. A melhoria na eficiência térmica também contribui para a redução de refugos e retrabalhos, minimizando o desperdício de matéria-prima. Dessa forma, os benefícios observados extrapolam o âmbito econômico, configurando-se também como ganhos significativos sob a perspectiva da sustentabilidade ambiental (Jayasankar *et al.*, 2025; Schuh, 2020).

3.2. Fator Econômico e social

Em contrapartida aos ganhos em tempo operacional, técnicas de impressão 3D em metais demandam elevado investimento inicial em equipamentos, matérias-primas e capacitação técnica especializada. Feriotti (2021) aponta que os materiais utilizados na manufatura aditiva podem atingir custos até nove vezes superiores aos insumos tradicionais, o que pode gerar resistência por parte da indústria na adoção dessa tecnologia. Esse cenário se intensifica em contextos nos quais processos convencionais ainda se mostram mais eficientes para determinadas aplicações (Pusateri *et al.*, 2023).

Sob a perspectiva da sustentabilidade social, esse alto custo inicial pode representar uma barreira à democratização do acesso tecnológico, concentrando o domínio da manufatura aditiva em empresas com maior capacidade de investimento e limitando sua difusão em contextos produtivos menos favorecidos. Tal dinâmica pode acentuar desigualdades tecnológicas e restringir oportunidades de desenvolvimento regional e industrial (Calignano; Mercurio, 2023).

Ainda assim, a situação apresentada é passível de reversão, uma vez que a impressão 3D, em contrapartida ao seu custo atual, oferece ganhos relevantes, como maior agilidade na produção de moldes de injeção e redução da necessidade de ferramentais complexos, comuns em processos como usinagem ou eletroerosão (Junior; Costa, 2019). Nesse sentido, o incentivo à pesquisa e ao desenvolvimento tecnológico torna-se fundamental para a redução progressiva dos custos, ampliando o acesso à tecnologia e favorecendo sua disseminação em diferentes escalas produtivas.

Além disso, a propagação do conhecimento científico e o investimento em formação profissional configuram-se como elementos centrais para a sustentabilidade social da manufatura aditiva. Vafadar *et al.* (2021) destacam que a carência de mão de obra qualificada é um dos principais entraves à adoção da tecnologia. Dessa forma, a criação de programas educacionais e iniciativas de capacitação técnica contribui não apenas para a consolidação da manufatura aditiva no setor industrial, mas também para a geração de empregos qualificados, o fortalecimento do capital humano e a promoção de inclusão produtiva. Assim, o avanço dessa tecnologia, quando associado à formação de recursos humanos e à ampliação do acesso ao conhecimento, apresenta potencial significativo para contribuir com o desenvolvimento social e a redução de desigualdades no contexto industrial.

3.3. Otimização Topológica

Na revisão sistemática de estudos acerca da sustentabilidade na manufatura aditiva realizada por Pusateri *et al.* (2023), referenciada ao longo do texto, destaca-se particularmente o potencial de processos como a impressão 3D na economia de energia e combustível por meio da otimização topológica. Isto é, o projeto de estruturas leves, por meio da versatilidade de design proporcionada pela manufatura aditiva, que necessitam de menos material para a mesma área de uma estrutura maciça. Exemplificadamente, o trabalho de Park

(2022) construiu um molde menos denso a partir de uma estrutura treliçada impressa em 3D. O foco da pesquisa de Park era investigar a relação entre a redução do peso e seu impacto nas propriedades mecânicas necessárias para um molde. O resultado foi promissor, com o desenvolvimento de uma estrutura 79% mais leve do que carcaças tradicionais capaz de suportar 400 injeções de PVC sem dano à sua composição.

Os trabalhos de Pusateri (2023) e Park (2022) revelam um outro benefício proporcionado pela manufatura aditiva, uma vez que, ao possibilitar economia de matéria-prima e, por consequência, energia e combustível, garante uma alternativa mais sustentável para a indústria de injeção, principalmente no que tange peças complexas de baixos volumes.

3.4. Qualidade e Material

A qualidade de peças injetadas em moldes impressos se mostra uma questão a qual diversas pesquisas investigam, defeitos como porosidade, superfícies brutas e deformações do design estão entre os mais comuns. Plessis (2020) investigou, em estruturas impressas, a influência de poros sobre as propriedades mecânicas dos produtos injetados. A pesquisa revelou que poros de até 0,5 mm não afetam características como resistência e ductilidade, porém, com o aumento de seus diâmetros, essas propriedades reduzem e falhas se tornam suscetíveis. Em um estudo sobre estratégias para a minimização das consequências da porosidade nas peças, Zeng (2019) construiu, a partir da união entre a manufatura aditiva e agentes espumantes (CrNx), um molde respirável com micro poros interconectados. A combinação de processos se mostrou um sucesso, com a diminuição da ocorrência de porosidades danosas. Além disso, o estudo originou a construção de uma rede de pequenos poros capazes de eliminar gases nocivos oriundos do processo de injeção que, em condições normais, presos no interior do molde, prejudicam o produto injetado.

A impressão 3D em metais também permite otimizações acerca da composição dos produtos. A manufatura aditiva multimaterial possibilita a combinação, camada por camada, de diferentes ligas metálicas ao longo do processo de impressão. Essa técnica tem a capacidade de integrar diferentes propriedades em um mesmo produto, além de reduzir o uso de matérias-primas críticas e potencialmente onerosas (Pusateri *et al.* 2023; Xu *et al.*, 2021). Entretanto, avanços em conhecimento técnico ainda são essenciais para a aplicação e aprimoramento seguro dessa tecnologia, uma vez que a manufatura aditiva multimaterial pode acarretar consequências para o processo de reciclagem. Bahuriddin (2025) aponta a incerteza da reciclabilidade de peças confeccionadas a partir de processos multimateriais frente às complicações ainda existentes na separação e processamento desses componentes.

O contexto apresentado revela que a manufatura aditiva ainda tem barreiras a serem enfrentadas a fim de assegurar definitivamente a qualidade das peças injetadas, bem como a sustentabilidade do pós-consumo dos moldes fabricados. Ainda assim, o estudo de Zeng (2019) evidencia os ganhos e superações os quais a impressão 3D é capaz de alcançar com o investimento em inovação, ao revelar não só uma alternativa para as implicações da porosidade, como também desenvolver um ganho para um problema antigo do processo de injeção.

3.5 Projeto

É evidente, após a análise do trabalho dos autores levantados, que descobertas são fundamentais para a aplicação da manufatura aditiva em metais na indústria termoplástica. Na busca por avanços, a atenção ao projeto de um produto injetado mostra-se essencial para a transição do processo tradicional às atuais propostas de fabricação. A interdisciplinaridade, então, torna-se uma alternativa para alcançar novas soluções sustentáveis. Barcellos e Galdenoro (2019) defenderam, em seu artigo, a intersecção entre design e engenharia como resultado ideal à inovação. A inclusão da perspectiva do designer no processo de injeção, por sua vez, foi justificada por Barbosa e Gomes (2024) a partir de seu caráter integrador, capaz de incorporar todas as necessidades do projeto em parceria com os respectivos setores atuantes.

Oliveira *et al.* (2023) caracterizaram, em um levantamento com profissionais da engenharia, a implementação estratégica de conceitos do design na etapa de projeto como uma influência direta na qualidade e competitividade de um produto no mercado. Perante esse contexto, é notável como a abordagem do projeto afeta diretamente a eficiência do resultado. Assim, valida-se a reflexão da influência do design do produto a ser injetado no fortalecimento da manufatura aditiva como uma resposta sustentável dentro do mercado de injeção. De acordo com Bahuriddin (2025), aproximadamente 80% dos impactos de sustentabilidade são configurados durante o projeto, ainda assim, estudos recentes sobre a sustentabilidade da manufatura aditiva revelam a negligência dessa etapa. O autor continua destacando a necessidade de que pesquisadores direcionem seu foco ao processo de design dentro da indústria.

Dessa forma, a atenção integrativa a todos os diferentes fatores do projeto mostra-se imprescindível para o sucesso do produto. O designer, então, assume, junto ao engenheiro, um papel crucial em garantir que o projeto seja planejado visando aspectos como sustentabilidade econômica, social e ambiental. Logo, o uso consciente e focado dessa interdisciplinaridade na indústria pode ser visto como uma peça chave para a implementação vitoriosa e sustentável da impressão 3D em metais no mercado polimérico (Moshiri *et al.*, 2020).

5. Conclusão

A existência de desafios estruturais na aplicação sustentável da manufatura aditiva na indústria plástica é inegável. Entretanto, perante as condições desenvolvidas durante o presente artigo, é possível constatar que as respostas para a superação se mostram sustentadas, ademais da necessidade de planejamento interdisciplinar e atento do projeto, pelo incentivo à pesquisa científica. Krizma (2022) e Yeole (2021) ilustram como estudos tecnológicos são capazes de fortalecer a impressão 3D ao aperfeiçoarem sua eficiência. Krizma (2022) confeccionou um modelo de inserto das cavidades impressas com foco na criação de alternativas para viabilização de lotes pequenos, que atualmente enfrentam limitações devido ao alto custo dos moldes tradicionais, mais facilmente compensados financeiramente em grandes produções. Yeole (2021), por sua vez, estudou o papel da angulação da extrusão do

material nas propriedades do molde, visando a melhoria de sua condutividade térmica, essencial para processos como a refrigeração. O resultado da pesquisa foi favorável, com a constatação do aumento da condutividade ao utilizar angulação de 0° durante a impressão.

Perante esse contexto, é notável as vantagens e as possibilidades que a impressão 3D em metais oferece para a otimização de processos da injeção. Benefícios em tempo de refrigeração, sustentabilidade e propriedades, como descobertas de estruturas mais leves, respiráveis ou com maior condutividade térmica, constroem o retrato de futuras potências que podem ser integradas ao mercado. Todavia, as barreiras ainda a serem subjugadas para a garantia de avanços seguros e ecoeficientes destacam a importância de estudos científicos e projetos interdisciplinares para a concretização do progresso tecnológico da manufatura aditiva na indústria termoplástica nos próximos anos.

Referências

- ARMSTRONG, M. An overview of modern metal additive manufacturing technology. **Journal of Manufacturing Processes**, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.10.060>
- BAHURIDDIN, N. S. et al. State of sustainability assessments of metal additive manufacturing: literature review and triple-bottom-line perspectives. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 32, p. 20825–20843, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36889-0>
- BARBOSA, A. L. R.; GOMES, M. V. M. O design aplicado ao gerenciamento no processo de desenvolvimento de produtos plásticos injetados. **Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana**, Curitiba, v. 22, n. 6, p. 1–12, 2024. Disponível em: <https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/5334/3433>. Acesso em: 4 maio 2025.
- BARCELLOS, E. E. I.; BOTURA JUNIOR, G. Design process: metodologia de interação entre design e engenharia como vetor de inovação. In: Congresso de pesquisa em design. 2019. DOI: <https://doi.org/10.5151/despro-ped2016-0111>
- CALIGNANO, F.; MERCURIO, V. An overview of the impact of additive manufacturing on supply chain, reshoring, and sustainability. **Cleaner Logistics and Supply Chain**, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2023.100103>
- FENG, S. Design and fabrication of conformal cooling channels in molds: review and progress updates. IN: **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121082>
- FERIOTTI, M. A. **Aplicações da manufatura aditiva e impressão 3D na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos**. Espírito Santo: BJPE, 2021.
- FERNANDES, J.; VIEIRA, L.; CASTELHANO, M. Revisão narrativa enquanto metodologia científica significativa: reflexões técnicas-formativas. Redes – **Revista Educacional da**

Sucesso, Caicó, v. 3, n. 1, p. 1–7, 2023. Disponível em: <https://www.editoraverde.org/portal/revistas/index.php/rec/article/view/223>

. Acesso em: 29 mar. 2025.

GARCIA, M. **Fundamentos de projeto de ferramentas**. Rio Grande do Sul: IFSUL, 2009.

JAYASANKAR, D.; TRÖSTER, T.; MARTEN, T. Optimizing injection molding tool design with additive manufacturing: a focus on thermal performance and process efficiency. **Materials**, v. 18, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18030571>

JUNIOR, J.; COSTA, [iniciais não informadas]. Manufatura aditiva aplicada na fabricação de insertos para moldes de injeção termoplásticos. 2019. DOI: <https://doi.org/10.18226/23185279.v7iss2p7>

KARIMINEJAD, M. Sensorised metal AM injection mould tools for in-process monitoring of cooling performance with conventional and conformal cooling channel designs. **Journal of Manufacturing Processes**, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.02.021>

KRIZSMA, S.; SZÉPLAKI, P.; SUPICZ, A. Coupled injection moulding simulation–thermal and mechanical simulation method to analyse the operational behaviour of additively manufactured polymeric injection moulds. **Results in Engineering**, v. 23, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102558>

MOSHIRI, M. An Industry 4.0 framework for tooling production using metal additive manufacturing-based first-time-right smart manufacturing system. **Procedia CIRP**, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.151>

OLIVEIRA, S. T. F. A. T.; BOTURA JUNIOR, G.; BARCELLOS, E. E. I. Relação entre inovação e design: visão dos profissionais e futuros profissionais de engenharia. **Contribuciones a las Ciencias Sociales**, São José dos Pinhais, v. 16, n. 7, p. 5912–5927, 2023. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/372334688>. Acesso em: 4 maio 2025.

PARK, S. J. Lightweight injection mold using additively manufactured Ti-6Al-4V lattice structures. **Journal of Manufacturing Processes**, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.05.022>

PLESSIS, A. D. Effects of defects on mechanical properties in metal additive manufacturing: a review focusing on X-ray tomography insights. **Materials & Design**, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108385>

PUSATERI, V. Quantitative sustainability assessment of metal additive manufacturing: a systematic review. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.12.005>

SCHUH, G. Towards temperature control measures for polymer additive injection molds. **Procedia CIRP**, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.050>

SILVA, J. **Manufatura aditiva de metais: princípios e práticas**. São Paulo: Editora Técnica, 2019a.

SILVA, J. **Moldagem por injeção e sua aplicação industrial**. São Paulo: Editora Técnica, 2019b.

VAFADAR, A. et al. Advances in metal additive manufacturing: a review of common processes, industrial applications, and current challenges. **Applied Sciences**, v. 11, n. 3, p. 1213, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11031213>

XU, P. Superior fatigue endurance exempt from high processing cleanliness of metal-injection-molded β Ti-Nb-Zr for bio-tolerant applications. **Materials & Design**, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110141>

YEOLE, P. Large-scale additive manufacturing tooling for extrusion-compression molds. **Additive Manufacturing Letters**, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2021.100007>

ZENG, G. H. 3D printed breathable mould steel: small micrometer-sized, interconnected pores by creatively introducing foaming agent to additive manufacturing. **Materials & Design**, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107693>