

Ferramental Rápido via Impressão 3D DLP: Influência nas Propriedades de Produtos Termoplásticos Injetados

Rapid Tooling via DLP 3D Printing: Influence on the Properties of Injection-Molded Thermoplastic Products

Keila Gonzaga Fagundes, Bacharela em Engenharia Mecânica, CEFET-MG.

Keilafagundes20@gmail.com

Artur Caron Mottin, Doutor, PPGEM, CEFET-MG.

Artur.mottin@cefetmg.br

Número da sessão temática da submissão – [03]

Resumo

O processo de moldagem por injeção é amplamente utilizado na produção em massa de peças plásticas, porém apresenta desafios relacionados ao alto custo inicial e ao longo prazo de entrega do ferramental metálico convencional. Nesse contexto, a Manufatura Aditiva, por meio do Ferramental Rápido, surge como uma alternativa viável para a fabricação de moldes de injeção termoplástica com menor investimento e tempo de produção. Este trabalho avalia o potencial técnico e econômico de um molde de injeção produzido por impressão 3D utilizando a tecnologia *Digital Light Processing* (DLP) e a resina fotopolimérica BASF Ultracur3D RG 3280, comparando-o a moldes metálicos convencionais. A metodologia incluiu simulações do processo de injeção no software Autodesk Moldflow Adviser 2025 para definição de parâmetros operacionais seguros, bem como ensaios de tração em corpos de prova injetados em moldes metálicos e aditivos; e uma análise de custos de fabricação da cavidade, visando avaliar a viabilidade técnica e econômica da solução proposta. Os resultados indicaram uma redução de 81% no custo de fabricação da cavidade via DLP e desempenho mecânico compatível, com aumento de aproximadamente 16% na tensão de ruptura das peças produzidas em moldes aditivos, demonstrando a viabilidade do ferramental rápido como alternativa aos métodos tradicionais.

Palavras-chave: *Digital Light Processing*, Manufatura Aditiva, Molde de Injeção Termoplástica.

Abstract

The injection molding process is widely used for mass production of plastic parts; however, it faces challenges related to the high initial cost and long lead time of conventional metal tooling. In this context, Additive Manufacturing, particularly Rapid Tooling, emerges as a viable alternative for producing thermoplastic injection molds with reduced investment and manufacturing time. This study evaluates the technical and economic potential of a thermoplastic injection mold manufactured via 3D printing using Digital Light Processing (DLP) technology and BASF Ultracur3D RG 3280 photopolymer resin, comparing it with conventional metal molds. The methodology included injection molding simulations using Autodesk Moldflow Adviser 2025 to define safe operating parameters, as well as tensile tests on specimens molded in both metal and additively manufactured molds. The results demonstrated an 81% reduction in cavity manufacturing cost using DLP and comparable mechanical performance, with an approximate 16% increase in ultimate tensile strength for parts

produced in additively manufactured molds. These findings confirm the technical and economic feasibility of DLP-based rapid tooling as an alternative to traditional tooling methods.

Keywords: Digital Light Processing, Additive Manufacturing, Thermoplastic Injection Mold

1. Introdução

O processo de moldagem por injeção é amplamente utilizado na produção em massa de peças plásticas, consistindo na injeção de polímeros termoplásticos fundidos sob alta pressão em cavidades de molde, que desempenham funções essenciais de distribuição do material, conformação, resfriamento e ejeção das peças, exigindo elevada precisão de projeto e fabricação, o que impacta diretamente nos custos do processo (Saraiva, 2016). A busca por maior eficiência produtiva e redução de manutenções tem impulsionado avanços nos materiais de ferramental, bem como a adoção de tecnologias alternativas, entre as quais se destaca a Manufatura Aditiva (MA), favorecida pelo avanço da impressão 3D e pela ampliação de suas capacidades técnicas e de materiais (Reis, 2017; Fu *et al.*, 2019).

Em 2025, a MA apresenta-se mais acessível e consolidada no ambiente industrial, com evidências na literatura de seu potencial para complementar ou substituir, em determinadas aplicações, moldes convencionais em aço, oferecendo benefícios como redução no consumo de matéria-prima e energia, produção descentralizada e menor dependência de ferramental específico (Morrow *et al.*, 2007; Le Bourhis *et al.*, 2013; Hoag *et al.*, 2012; Feriotti *et al.*, 2021; Fernandes *et al.*, 2014; Kreiger, 2013; Wittbrodt *et al.*, 2015). Apesar das vantagens associadas à redução de custos e tempo de fabricação, moldes produzidos por manufatura aditiva apresentam limitações relacionadas à resistência mecânica, estabilidade térmica e vida útil, o que restringe sua aplicação a contextos específicos, como prototipagem funcional e produção de pequenas séries. A busca por soluções de ferramental mais ágeis e econômicas levou ao desenvolvimento da fabricação híbrida, que integra diferentes métodos de manufatura. Sobre essa abordagem, Dizon *et al.* (2020, p. 151) afirmam que:

A fabricação híbrida, que combina dois ou mais tipos de fabricação, está sendo adotada globalmente. Combinar manufatura aditiva com manufatura formativa (ex.: moldagem por injeção) também demonstra algum potencial e foi recentemente relatado pelos autores. Combinar impressão 3D (para design de molde e padrão) e moldagem por injeção (para produção em massa via injeção de material) parece ser uma combinação ideal. Este tipo de fabricação híbrida oferece uma alternativa mais barata em comparação com o uso de moldes de alumínio/aço.

A ampliação do uso da Manufatura Aditiva na fabricação de moldes impõe desafios relacionados à seleção adequada de materiais e tecnologias, uma vez que essas escolhas impactam diretamente o desempenho do ferramental, a qualidade do produto final, a eficiência do processo e os custos de produção. Nesse contexto, este trabalho analisa os parâmetros técnicos de moldes de injeção termoplástica produzidos por impressão 3D DLP, com enfoque na caracterização das propriedades físico-químicas da resina utilizada, na avaliação das propriedades mecânicas das peças injetadas e na análise de custos de fabricação do ferramental. O estudo é complementado por simulações computacionais do processo de injeção para prever limitações do molde, bem como pela análise das propriedades mecânicas dos moldes fabricados, visando discutir as potencialidades e os desafios do uso de moldes

poliméricos produzidos por Manufatura Aditiva como alternativa parcial aos moldes metálicos convencionais.

2. Procedimentos Metodológicos

Os procedimentos metodológicos adotados neste trabalho foram estruturados em quatro etapas principais: (i) simulação do processo de injeção por meio do software Moldflow Adviser, (ii) desenvolvimento e fabricação do ferramental via impressão 3D DLP, (iii) análise de custos do ferramental produzido e (iv) estudo comparativo entre moldes aditivos e metálicos, considerando desempenho mecânico e viabilidade econômica.

2.1 Simulação no Moldflow Adviser 2025

A análise da variação da pressão de injeção foi realizada por meio de simulações no software Autodesk Moldflow Adviser 2025, considerando as características do molde fabricado por impressão 3D via tecnologia DLP. Para execução das simulações, foram definidos os seguintes parâmetros de processo:

1. Temperatura do Molde (*Mold Temperature*): 40 °C (valor dentro da faixa de 10 °C a 38 °C recomendada pelo software).
2. Temperatura de Fusão (*Melt Temperature*): 190 °C (valor dentro da faixa de 170 °C a 230 °C para o polímero injetado).
3. Limite Máximo de Pressão da Máquina (*Maximum machine injection pressure*): 150 MPa, valor inserido para dimensionar a máquina injetora (variável da simulação).
4. Tempo de Abertura do Molde (*Machine Clamp Open Time*): 4,00 segundos.
5. Tempo de Injeção da Máquina (*Machine injection time*): Determinado automaticamente pelo software.

Além disso, o tempo de injeção e o tempo de recalque foram determinados automaticamente pelo software (*Automatic Injection Time e Automatic Velocity / Pressure Switch-Over*), com a mudança da fase de velocidade para pressão programada para ocorrer a 99% do volume da cavidade preenchida. E na aba Material do software Autodesk Moldflow Adviser 2025, selecionou-se o material NatureWorks PLA 7000D (o mais similar ao material a ser injetado NatureWorks PLA 4043D para a fabricação dos corpos de prova). Esta escolha foi realizada por representar o material de análise que mais se assemelha ao PLA efetivamente utilizado na moldagem dos corpos de prova, garantindo a fidelidade dos parâmetros de simulação com as condições reais do experimento¹. Este polímero é caracterizado por um ponto de fusão baixo, entre 145 °C e 160 °C, e uma temperatura de processamento recomendada de 210 ± 8 °C. Tais propriedades são cruciais, pois a baixa temperatura de fusão do material minimiza o estresse térmico imposto ao molde polimérico impresso em 3D.

A rigorosa definição dos parâmetros de simulação e a escolha estratégica do material, referenciado pelo NatureWorks PLA 7000D, garantiram a fidelidade do modelo virtual às condições do experimento real. Ao configurar a Temperatura de Fusão e limitar a pressão

máxima, a simulação foi estabelecida para proteger a integridade do molde, que possui limitações térmicas e mecânicas em comparação com o aço. Com o ponto de comutação de velocidade para pressão ajustado em 99% do volume, a análise permitirá a determinação da pressão mínima de injeção necessária, validando os parâmetros operacionais seguros e eficientes para o ferramental produzido via DLP. A seleção do PLA como material de injeção deve-se à sua baixa temperatura de processamento, o que minimiza o carregamento térmico imposto ao molde polimérico, tornando-o adequado para avaliação de ferramental produzido por manufatura aditiva.

2.2 Impressão do Molde de Injeção Termoplástica

A geometria do molde de injeção termoplástica foi definida com base na necessidade de comparação direta com um ferramental metálico de referência disponível no CEFET-MG Campus Nova Gameleira, garantindo uma base válida para a avaliação do desempenho do molde aditivo. O projeto e a modelagem da cavidade foram desenvolvidos nos softwares AutoCAD e SolidWorks (Figura 1), respeitando as dimensões, tolerâncias e requisitos de montagem no porta-molde, bem como as limitações da impressora 3D DLP, com o objetivo de otimizar o consumo de resina. Foram mantidas a réplica integral dos sistemas funcionais do molde metálico original, incluindo fixação e alinhamento, injeção e alimentação, extração e sistema de resfriamento. O desenvolvimento e a impressão do molde foram realizados por alunos orientados pelo professor Artur Caron Mottin, sendo este trabalho dedicado à análise dos dados obtidos nas experimentações conduzidas.

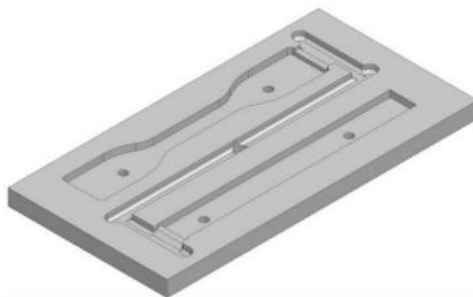


Figura 1 - Cavidade do Molde Desenvolvido no Solidworks. Fonte: Os autores (2026).

A modelagem do ferramental foi realizada em três dimensões, contemplando a cavidade e a estrutura do molde conforme as exigências geométricas e as restrições de montagem no frame metálico, sendo o modelo posteriormente exportado em formato STL para preparação no software fatiador da máquina Anycubic. A fabricação do ferramental experimental foi realizada por meio da impressão 3D DLP, utilizando a impressora Anycubic Photon M5S, selecionada pela alta resolução e precisão exigidas para cavidades funcionais e pelo alinhamento com pesquisas em andamento sob orientação do professor Artur Caron Mottin. Para a impressão, foi utilizada a resina fotopolimérica Ultracur3D® RG3280, desenvolvida pela BASF, pertencente à família de resinas rígidas, a qual apresenta elevada rigidez (10000 MPa) e resistência térmica, com temperatura de deflexão térmica (HDT) superior a 280 °C a 0,45 MPa, requisitos essenciais para suportar o calor do termoplástico injetado. Apesar do alto teor

de partículas cerâmicas (aproximadamente 67% em peso), a resina mantém baixa viscosidade (230 mPas) e estabilidade de suspensão, facilitando sua manipulação e o processo de impressão, além de resultar em peças finais com estética e textura semelhantes às da cerâmica branca. A escolha da resina Ultracur3D® RG3280 foi fundamentada em suas propriedades térmicas e mecânicas, especialmente a elevada temperatura de deflexão térmica (HDT) e rigidez, características essenciais para suportar as condições de temperatura e pressão do processo de injeção, reduzindo riscos de deformação do ferramental.

Os parâmetros de impressão foram definidos para garantir a máxima precisão dimensional e integridade do molde, utilizando uma Altura de Camada (*Layer Height*) de 0,05 mm. Para as camadas normais (*Normal Layers*), o tempo de exposição (*Exposure Time*) foi de 2,3 segundos, com uma velocidade de levantamento (*Lifting Speed*) de 60 mm/min. Para as camadas de base (*Bottom Layers*), essenciais para a adesão à plataforma, o tempo de exposição foi maior, de 30 segundos. O tempo de descanso (*Rest Time After Retract*) de 4 segundos após a retração para permitir a estabilização da resina antes da exposição à luz, otimizando a qualidade da cura. Após a definição dos parâmetros de impressão o software fatiador da Anycubic Photon Mono M5s forneceu as informações essenciais para a fabricação e o cálculo de custos do ferramental.

O volume total de resina necessário para imprimir o molde foi de 184,176 mL e a duração estimada da impressão foi de 4 horas 49 minutos e 15 segundos. É importante ressaltar que o tempo de impressão real foi, em média, consistente com essa estimativa, confirmando a precisão do software na fase de planejamento. Após a conclusão da construção da peça, o ferramental foi submetido às etapas de Pós-Processamento, cruciais para a obtenção das propriedades finais e a integridade dimensional. O processo se iniciou com a Lavagem, onde as peças foram removidas da plataforma e limpas em álcool isopropílico (IPA), utilizando a estação de lavagem e cura Creality UW-01. Este procedimento é essencial para dissolver e remover o excesso de resina líquida não polimerizada aderida à superfície do molde, sendo realizado por um tempo de 5-10 minutos. Em seguida, as peças foram submetidas à Cura Final (Pós-Cura UV), uma etapa obrigatória que garante a polimerização total do fotopolímero. Esta exposição à luz UV, realizada na própria estação Creality UW-01, é crítica para que o molde atinja a resistência térmica e mecânica necessária para suportar as condições de alta pressão e temperatura do processo de moldagem por injeção sem deformação ou degradação prematura, sendo o tempo de cura definido em 30 minutos. A Figura 2 evidencia o molde, já curado e pronto para a montagem e os testes de injeção.



Figura 2 - Ferramental Aditivo Pronto para Montagem no Porta-Molde Metálico. Fonte: Os autores (2026).

2.3 Custo do Ferramental Impresso

Este estudo avalia a aplicabilidade do ferramental impresso via DLP a partir de dois eixos principais: propriedades mecânicas e viabilidade econômica. As propriedades mecânicas dos corpos de prova injetados (resistência à tração, tensão na ruptura e módulo de elasticidade) foram comparadas entre amostras produzidas em molde DLP e em molde metálico convencional, com ensaios de tração realizados no laboratório CDE da Escola de Design da Universidade do Estado de Minas Gerais, totalizando trinta amostras por tipo de molde. As variações observadas foram associadas principalmente às diferenças na taxa de resfriamento impostas por cada ferramental, sendo de 25 segundos para o molde metálico e de 40 segundos para o molde impresso via DLP, o que influencia a estrutura e o grau de cristalinidade do polímero. Por fim, os resultados técnicos foram integrados a uma análise de custos, visando relacionar o desempenho dos moldes à sua aplicação mais adequada, como prototipagem funcional, produção de pequenas séries ou produção em larga escala, com base em dados provenientes de ensaios conduzidos em pesquisas orientadas pelo professor Artur Caron Mottin.

2.4 Estudo Comparativo da Performance entre Moldes Aditivos e Subtrativos

Segundo Garcia (2009) os custos de um molde de injeção termoplástica podem ser calculados de duas maneiras diferentes: baseados em dados já existentes de planilhas de produção ou baseado no procedimento de previsão. Quando o processo é baseado em dados já existentes, ele fornece o custo para cada etapa de trabalho, se fundamentando em dados históricos e informações de projetos anteriores para calcular o custo do molde de injeção. Permitindo assim uma alocação precisa dos custos para cada etapa de trabalho. Entretanto, a aplicação desse método é desafiadora, pois exige um conhecimento aprofundado dos custos operacionais, horas de trabalho dedicadas à fabricação e dos materiais de fabricação dos moldes (baseados em padrões obtidos de catálogos de fabricantes).

Uma proposta para otimizar o processo de estimativa de custos sugere a divisão do cálculo total em quatro grupos de custos, cada um com sua própria função correspondente. Essa abordagem sistemática determina o custo de cada grupo individualmente, que depois é adicionado para compor o valor final. Essa metodologia, ao estruturar o processo em partes menores, reduz significativamente os riscos de erros de cálculo e minimiza o impacto desses erros sobre o custo total. Os quatro grupos mencionados são: Grupo 1 – Custo da Cavidade, Grupo 2 – Base do Molde, Grupo 3 – Componentes Funcionais Básicos e Grupo 4 – Funções Especiais.

O primeiro grupo de custos, que será utilizado nesse trabalho, refere-se aos gastos associados à fabricação das cavidades do molde. Esses custos são influenciados principalmente por três fatores: custo médio de máquina e mão de obra, tempo gasto na cavidade, tempo gasto com EDM (*Electric-Discharge Machining*) e custos de materiais adicionais (insertos, eletrodos etc.). A determinação desses custos é realizada calculando-se o tempo total necessário para a usinagem (tE) o acabamento das cavidades (tC) que é então multiplicado pelo custo horário da máquina e mão de obra (CMW) correspondente e acrescido dos custos de materiais adicionais (CM), resultando no custo para cavidade (CC) (Equação 1).

$$C_C = (t_C + t_E).C_{MW} + C_M \quad (1)$$

Para o custo total da cavidade temos o tempo gasto na cavidade (t_C), que foi apresentado durante a impressão da cavidade no software Anycubic Photon Workshop. O tempo gasto com EDM (t_E) é desconsiderado e assumido como nulo. Isso ocorre porque o processo de MA constrói a cavidade do molde diretamente a partir da resina fotopolimérica curada, eliminando a necessidade de usinagem secundária. O tempo de Eletroerosão é inerente apenas à fabricação de moldes metálicos tradicionais, onde é exigido para criar detalhes complexos, cantos vivos ou para usinar aços já endurecidos. Ao eliminar o EDM, o método aditivo remove uma das etapas mais demoradas e caras da produção convencional de moldes, o que contribui diretamente para a redução do custo de produção.

O custo médio da máquina e mão-de-obra (SMW) representa o valor necessário para manter a impressora 3D DLP operacional por uma hora, consolidando todos os gastos fixos e variáveis. O cálculo foi obtido pela soma do Custo de Implantação do Equipamento, a Depreciação, o Custo de Manutenção, Consumo de Energia e o Custo de Mão de Obra para Operação do Equipamento. O Custo de Implantação do Equipamento foi definido como o investimento total necessário para tornar a célula de MA operacional e distribuído por toda vida útil estimada o equipamento. Devido à natureza da tecnologia DLP e à portabilidade dos equipamentos de bancada, não foram incorridos custos significativos com instalação especial, fundações ou infraestrutura complexa. Portanto, o custo de implantação para a impressora Anycubic Photon Mono M5s foi estabelecido como a soma do valor de aquisição da impressora e do custo da máquina de lavagem e cura Creality UW-01.

A Depreciação do equipamento garante que o custo total de todos os ativos necessários para iniciar a produção seja devidamente considerado e amortizado ao longo da vida útil do ferramental. Para o seu cálculo foi utilizada a Equação 2, que indica um método linear, pressupondo-se que a depreciação ocorra de forma constante ao longo da vida útil do equipamento. Ou seja, um montante igual do valor do equipamento é depreciado a cada ano durante sua vida útil. Essa é “a forma mais comum que as empresas utilizam no cálculo de despesas e perda de valor do seu ativo” (CORDEIRO, 2025, online).

$$\text{Depreciação} = (\text{Valor inicial} - \text{Valor final}) / \text{Vida útil} \quad (2)$$

Segundo Cordeiro (2025) no cálculo da depreciação, o valor de aquisição representa o custo total do bem quando é incorporado. Em contraste, o valor do equipamento ao final de sua vida útil é definido como valor residual (ou de sucata). Este valor final pode ser determinado por meio de estimativas ou tabelas específicas. Para o desenvolvimento desse trabalho utilizou-se a Tabela de Taxas de Depreciação disponibilizada pela Receita Federal, considerando a impressora 3D e da máquina de lavagem e cura na categoria de bens ‘Máquinas eletrônicas de calcular com dispositivo impressor incorporado’, tendo assim uma taxa de depreciação de 10% ao ano, e uma vida útil total de 10 anos.

Embora se reconheça que a área de MA é caracterizada por um rápido avanço tecnológico que torna os equipamentos, como a Anycubic Photon Mono M5se e a máquina de lavagem e cura Creality UW-01, economicamente obsoletos em um período mais curto (geralmente entre 3 e 5 anos), a vida útil total adotada para o cálculo da depreciação foi estabelecida em 10 anos. Essa decisão metodológica se baseia na rigidez contábil e fiscal, que frequentemente alinha a depreciação de máquinas industriais ao período de 10 anos, conforme Tabela de Taxas de Depreciação disponibilizada pela Receita Federal. Ao utilizar este período estendido, o custo de aquisição dos equipamentos é amortizado em uma taxa anual menor. Assim, embora a obsolescência seja uma realidade operacional, o cálculo da Depreciação baseia-se na vida útil total dos bens, garantindo a consistência com as práticas de análise de custos industriais.

O Custo de Consumo de Energia é um componente variável calculado com base na taxa horária de utilização da impressora. A Anycubic Photon Mono M5s possui um consumo nominal de 90 Wh (ANYCUBIC PHOTON..., 2023). Para a determinação do custo por hora, utilizou-se a tarifa da CEMIG aplicável a ambientes laboratoriais e de serviços, que é a tarifa B3 - Demais Classes na Bandeira Vermelha 2, cujo valor é de R\$ 0,9373500 por kWh (considerando o cenário mais crítico). A adoção dessa tarifa garante que o cálculo reflita o custo operacional em um cenário industrial de baixa tensão. Assim, o custo horário de energia foi obtido somando os consumos da impressora (90 Wh) e da máquina de lavagem e cura Creality UW-01 (96Wh) e multiplicando pela tarifa elétrica vigente.

Para o Custo de Manutenção do equipamento foi determinado por uma abordagem baseada nos custos reais de reposição de consumíveis, que são os principais fatores de desgaste. Conforme consulta especializada com a 3DLab Soluções em Impressão 3D (unidade Belo Horizonte), o gasto de manutenção para impressoras DLP se concentra quase que exclusivamente na substituição da tela LCD e das lâmpadas UV da máquina de lavagem e cura Creality UW-01. A troca desses componentes é realizada pelo próprio operador, sem incorrer em custos adicionais de mão de obra especializada externa. Para o cálculo, considerou-se a vida útil da tela LCD da Anycubic Photon Mono M5s em 2.000 horas de exposição. Assim o custo de manutenção e consumíveis é alocado pela soma do valor de reposição da tela LCD e do filme FEP, amortizado pela vida útil em horas de operação. Este método garante que o Custo de Manutenção reflita o desgaste real e a natureza de baixo custo de manutenção da tecnologia DLP.

O Custo de Mão de Obra para Operação do Equipamento foi determinado por meio de uma pesquisa de mercado focada no salário médio de profissionais que atuam como operadores de máquinas de impressão 3D na região de Belo Horizonte. A adoção de um valor regional específico confere maior precisão e validade empírica à análise econômica. O cálculo da taxa horária total de mão de obra segue a metodologia de custos industriais e envolve duas etapas principais:

1. **Custo Total para a Empresa (Inclusão de Encargos):** O salário médio mensal bruto obtido na pesquisa é multiplicado por um Fator de Encargos Sociais e Benefícios (tipicamente entre 1.8 e 2.2 no Brasil). Este fator abrange todas as obrigações patronais, impostos e benefícios, determinando o custo real que a empresa tem com o funcionário por mês.
2. **Determinação do Custo Horário:** O Custo Total Mensal para a Empresa é, então,

dividido pela jornada de trabalho mensal do operador (geralmente 220 horas, com base em uma carga horária de 44 horas semanais).

A taxa horária resultante é o valor que será alocado ao Custo de Mão de Obra para Operação do Equipamento, representando o gasto de pessoal para cada hora de impressão do ferramental aditivo. Os custos de materiais adicionais (CM) foram calculados a partir do volume de resina utilizado para impressão da cavidade, convertendo-se volume em massa a partir da relação com a densidade da resina BASF Ultracur3D RG 3280, de $1,73 \text{ g/cm}^3$ para o sólido (BASF ULTRACUR3D..., [2025]). O custo de insumos da célula DLP foi complementado com o custo do álcool isopropílico, que é um consumível obrigatório para a limpeza e remoção do excesso de resina. Considerando o custo de aquisição do álcool e o volume médio de 50 ml consumido (evaporado e contaminado) por ciclo de impressão, o custo foi alocado por hora de operação. Garantindo que os custos com limpeza e pós-processamento estejam incluídos no custo.

3. Resultados

3.1 Resultados Simulação no Moldflow Adviser 2025

A seguir, são apresentados os principais resultados obtidos, seguidos da discussão técnica dos efeitos observados. Para a temperatura de 190°C o preenchimento ótimo foi observado com a aplicação de uma pressão máxima de 200 MPa, conforme observado na Figura 3. As regiões assinaladas em verde indicam alta confiabilidade no preenchimento, sugerindo uma completa e homogênea ocupação da cavidade do molde.

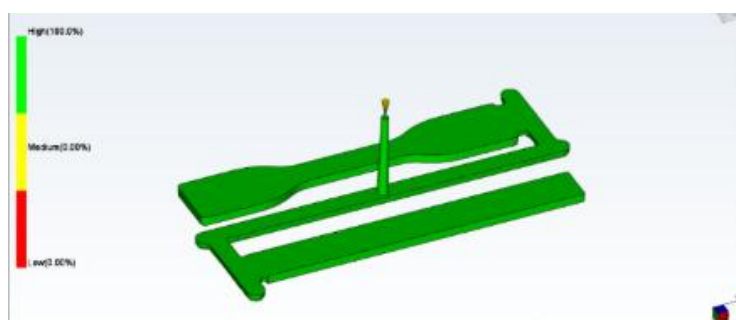


Figura 3 – Amostra Injetada com pressão de 200 MPa a 190°C . Fonte: Os autores (2026).

Já na temperatura de 190°C , verificou-se que a ocorrência de áreas amarelas (Figura 4) que foi verificada em um intervalo de pressões de 190 MPa a 160 MPa. Essas áreas indicam um nível de confiança médio no preenchimento da peça, sugerindo potenciais riscos de falhas e inconsistências. A análise demonstrou que a redução da pressão máxima de injeção para 150 MPa implicou em um aumento do risco de preenchimento incompleto da cavidade. Observou-se áreas com baixa confiança de preenchimento e uma maior propensão à formação de defeitos. Isso sugere que condições de pressão abaixo de 150 MPa são inadequadas para assegurar a integridade do produto final.

A partir da análise realizada, constatou-se que a redução da pressão máxima de injeção para 50 MPa resultou em falhas de preenchimento evidentes e consistentes. Tal ocorrência implica em potenciais comprometimentos na integridade estrutural e nas propriedades finais da peça moldada. Essas falhas comprometem significativamente a integridade da peça injetada. A extensão desses defeitos reforça a sensibilidade do processo de injeção às condições de pressão máxima, implicando em potenciais comprometimentos na integridade estrutural e nas propriedades finais da peça moldada.

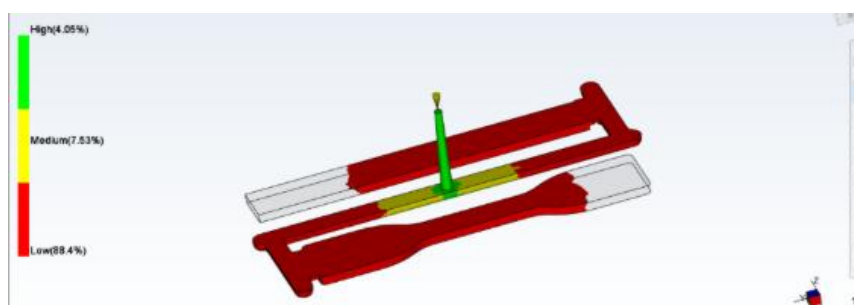


Figura 4 - Amostra Injetada com pressão de 50 MPa a 190°C. Fonte: Os autores (2026).

3.2 Resultados das Avaliação das Peças Injetadas

Para a execução dos testes de injeção no molde metálico e no molde BASF, o polímero utilizado foi o PLA 4043D *NatureWorks*, seguindo um protocolo otimizado para garantir o melhor compromisso entre a qualidade da peça e a produtividade. Os parâmetros cruciais do processo foram estabelecidos da seguinte forma: a Temperatura do Fundido foi mantida em 190 °C, enquanto a Temperatura do Molde foi ajustada para 40 °C, buscando um resfriamento rápido. A Pressão de Recalque aplicada foi de 22 kN, sendo sustentada por 15 segundos para compensar a contração do material. A Força de Fechamento utilizada pela injetora foi de 55 kN. Com o objetivo de avaliar a influência do tipo de molde utilizado no processo de injeção termoplástica, foram realizados ensaios de tração em 30 corpos de prova injetados em moldes metálicos e outros 30 em moldes confeccionados por manufatura aditiva, utilizando a tecnologia DLP. Nesse contexto, a etapa de resfriamento é considerada crítica, pois, segundo Feriotti *et al.* (2021), representa em média 60% a 70% do tempo total do ciclo do processo de injeção.

Nos ensaios realizados, o tempo total de ciclo foi de aproximadamente 1 min 45 s (105 s) para os moldes em resina BASF produzidos por DLP e de 1 min 30 s (90 s) para o molde metálico. O tempo de resfriamento foi de cerca de 40 s para o molde polimérico e de 25 s para o molde metálico. Dessa forma, o resfriamento representou aproximadamente 38,1% do tempo total do ciclo para o molde DLP e cerca de 27,8% para o molde metálico. Embora esses valores estejam abaixo da faixa média reportada por Feriotti *et al.* (2021), os resultados mantêm a tendência descrita na literatura, evidenciando que moldes com menor condutividade térmica demandam maior tempo de resfriamento e prolongam o ciclo de injeção. As propriedades mecânicas obtidas incluem força máxima, força na ruptura, tensões correspondentes, módulo de elasticidade e deformação na ruptura. A Tabela 1 e

a Tabela 2 indicam respectivamente as médias dos dados obtidos nos ensaios de tração realizados com peças injetadas no molde metálico e no molde impresso via DLP.

Tabela 1 - Ensaio De Tração Peças Injetadas No Molde Metálico

	Largura (mm)	Espessura (mm)	Força Máx. (N)	Força Ruptura (N)	Tensão Força Máx. (Mpa)	Tensão Ruptura (Mpa)	Mod. Elástico. (Mpa)	Def. Ruptura (mm)
Média	9,387	3,482	1691	1496	51,77	45,74	1305	2,410
Mediana	9,400	3,475	1701	1500	52,28	46,62	1288	2,316
Desvio Padrão	0,1345	0,1228	135,5	167,5	4,009	4,640	169,3	0,5154
Coef. Var. (%)	1,433	3,527	8,010	11,20	7,744	10,14	12,98	21,39

Fonte: Os autores (2025).

Tabela 2 - Ensaio De Tração Peças Injetadas No Molde Impresso Via DLP

	Largura (mm)	Espessura (mm)	Força Máx. (N)	Força Ruptura (N)	Tensão Força Máx. (Mpa)	Tensão Ruptura (Mpa)	Mod. Elástico. (Mpa)	Def. Ruptura (mm)
Média	9,623	3,324	1785	1706	55,80	53,33	1230	2,189
Mediana	9,610	3,330	1788	1731	56,30	53,78	1240	2,177
Desvio Padrão	0,08805	0,03360	54,82	106,3	1,967	3,144	38,82	0,2612
Coef. Var. (%)	0,9149	1,011	3,072	6,228	3,525	5,895	3,158	11,93

Fonte: Os autores (2025).

4. Análises dos Resultados e Discussões

4.1 Simulação no Moldflow Adviser 2025

A pressão de injeção desempenha papel fundamental no processo de moldagem por injeção, influenciando diretamente o preenchimento da cavidade, a qualidade superficial e a estabilidade dimensional da peça, sendo essencial para garantir o controle do processo e a integridade do molde. A análise do escoamento do polímero permitiu compreender o comportamento da frente de fluxo e a distribuição de pressão necessária para vencer as perdas de carga da geometria, definindo a pressão mínima adequada e evitando esforços excessivos no ferramental. Essa avaliação foi realizada por meio de simulações de preenchimento no software *Autodesk Moldflow Adviser 2025*, a uma temperatura constante de 190 °C, cujos resultados evidenciaram a sensibilidade do processo às variações de pressão

máxima, impactando diretamente a confiabilidade do preenchimento e a ocorrência potencial de defeitos. A Tabela 3 a seguir sintetiza a avaliação de preenchimento sob diferentes condições de pressão.

Tabela 3 - Simulação Moldflow: Confiabilidade de Preenchimento

Pressão Máxima (MPa)	Confiabilidade do Preenchimento	Observações
200	Ótima (Alta Confiabilidade)	Preenchimento completo e homogêneo, indicado por regiões verdes.
190-160	Média (Risco Potencial)	Ocorrência de áreas amarelas, sugerindo potenciais riscos de falhas e inconsistências.
150	Baixa (Risco Elevado)	Aumento da área demarcada em vermelho, indicando alta propensão à formação de defeitos e preenchimento incompleto.
50	Falha Crítica	Falhas de preenchimento evidentes e consistentes, comprometendo a integridade estrutural da peça.

Fonte: Os autores (2025).

4.2 Avaliação das Peças Injetadas

A análise estatística dos resultados da avaliação das peças injetadas permite uma comparação robusta entre os dois grupos, fornecendo subsídios para avaliar a viabilidade do uso de moldes impressos em 3D no processo de injeção de termoplásticos, considerando aspectos como desempenho mecânico, reprodutibilidade e potencial de aplicação industrial. A tensão média de ruptura observada nos corpos de prova injetados em moldes fabricados por impressão 3D via DLP foi de 53,33 MPa, enquanto as amostras provenientes de moldes metálicos apresentaram valor médio de 45,74 MPa. Esse resultado representa um aumento aproximado de 16% na tensão de ruptura das amostras produzidas em moldes DLP. Esse comportamento indica um desempenho mecânico superior quanto à resistência à fratura, com capacidade de suportar níveis mais elevados de tensão antes da falha, quando comparado ao material injetado em molde metálico convencional.

Esse ganho de desempenho pode ser explicado pelas diferenças no regime de transferência de calor entre os materiais dos moldes. A menor condutividade térmica dos moldes poliméricos fabricados por DLP promoveu um resfriamento mais lento e uniforme do polímero injetado, favorecendo a formação de uma morfologia interna caracterizada por esferulitos de maior tamanho, conforme descrito por Kampker *et al.* (2019). Essa microestrutura está associada ao aumento da resistência à ruptura, corroborando a influência do material do ferramental nas propriedades finais das peças. Em contrapartida, no que se refere à rigidez do material, avaliada pelo módulo de elasticidade, observou-se valor médio de 1230,00 MPa nas amostras injetadas em moldes DLP, enquanto as peças provenientes de moldes metálicos apresentaram média de 1305,00 MPa. O acréscimo de aproximadamente 5,75% no módulo de elasticidade das amostras moldadas em ferramental metálico indica que a maior

condutividade térmica do molde convencional promoveu taxas de resfriamento mais elevadas, resultando em uma estrutura polimérica mais rígida.

Segundo Kampker *et al.* (2019), a taxa de resfriamento imposta pelo material do molde é um fator determinante na morfologia final do polímero, influenciando diretamente o tamanho dos esférulitos e a organização das regiões cristalinas. Nesse contexto, a menor dissipação térmica característica dos moldes fabricados por manufatura aditiva resulta em um resfriamento mais lento, favorecendo a formação de esférulitos maiores, o que pode explicar a redução do módulo de elasticidade e a maior susceptibilidade à deformação elástica observadas nas amostras produzidas em moldes DLP. Adicionalmente, o desempenho superior em tensão máxima observado nas amostras DLP pode ser associado não apenas aos efeitos térmicos, mas também às diferenças de interação interfacial entre o polímero fundido e a superfície do molde, bem como às alterações na microestrutura final das peças. Dessa forma, o uso da manufatura aditiva na fabricação de moldes demonstra potencial não apenas para acelerar o desenvolvimento do ferramental, mas também para modular as propriedades mecânicas dos produtos injetados. A Tabela 4 apresenta o resumo dos principais pontos observados neste estudo, consolidando as diferenças de custo, processamento e desempenho mecânico entre os moldes.

Os resultados obtidos neste estudo estão alinhados com achados da literatura, como os apresentados por Feriotti *et al.* (2021) e Kampker *et al.* (2019), que também destacam a influência da condutividade térmica do molde nas propriedades finais das peças injetadas. No entanto, diferentemente de estudos anteriores, este trabalho evidencia não apenas o impacto nas propriedades mecânicas, mas também uma redução significativa nos custos de fabricação, ampliando a discussão sobre a viabilidade econômica da manufatura aditiva aplicada ao ferramental rápido.

4.3 Custo de Ferramental: MA como Alternativa ao Metal

O estudo realizado indica que um molde com cavidade de MA impresso com tecnologia DLP e com a resina BASF Ultracur3D RG 3280 custa R\$ 973,44 por unidade fabricada. Enquanto uma pesquisa de mercado na cidade de Contagem, constatou que o mesmo molde fabricado em aço 4043 (envolvendo usinagem e Eletroerosão — EDM) custa em média R\$5.000,00. A análise comparativa de custo de fabricação da cavidade revela, portanto, uma economia de 81% na aquisição do ferramental aditivo em relação ao molde metálico. Este resultado reforça o argumento de que a MA é uma solução economicamente viável para a produção de lotes e protótipos, onde o alto custo fixo da usinagem convencional tem um grande impacto.

A análise do Custo Horário Total da Máquina e Mão de Obra (SWM) resultou em uma taxa de R\$ 47,45 por hora de operação. A composição deste custo horário revela que a Mão de Obra é o fator dominante, respondendo por aproximadamente 97% do valor total, enquanto os custos de depreciação, energia e manutenção são marginais, representando menos de 3% da taxa horária. Ao calcular o Custo Total da Cavidade (CC), o resultado foi de R\$ 973,44. Neste custo final da peça, a estrutura de custos se inverte: o Custo de Insumos (Resina e Álcool) é o fator predominante, correspondendo a cerca de 76% do valor total, enquanto o custo associado ao tempo de máquina (Mão de Obra incluída) representa apenas os 24% restantes.

Este resultado é crucial, pois demonstra que, no Ferramental Rápido DLP, a viabilidade econômica é determinada principalmente pelo custo da matéria-prima.

5. Conclusão ou Considerações Finais

Além dos aspectos técnicos, este trabalho tem como objetivo investigar o impacto da escolha de materiais e tecnologias nos custos de produção do ferramental, tratando a análise econômica como um dos eixos centrais do estudo. O presente estudo atingiu seu objetivo principal ao avaliar a viabilidade técnica e econômica do uso de ferramentais rápidos de polímero, fabricados por MA via DLP, para o processo de moldagem por injeção de termoplásticos. A etapa inicial de simulação no software Moldflow Adviser 2025 foi crucial, pois validou a integridade do molde polimérico e estabeleceu os parâmetros seguros de operação, determinando uma pressão máxima de injeção de 200 MPa a 190 °C como condição ótima para o preenchimento completo da cavidade. Essa análise virtual demonstrou a sensibilidade do ferramental às pressões e forneceu a base para mitigar riscos, garantindo a proteção e a funcionalidade do molde durante os ensaios práticos.

A avaliação funcional das peças injetadas revelou um resultado inesperado e significativo em termos de desempenho mecânico. Os corpos de prova moldados com o ferramental DLP apresentaram uma tensão média de ruptura 16% superior e um aumento de aproximadamente 7,79% na capacidade de suportar a tensão máxima, em comparação com as amostras provenientes do molde metálico. Embora as peças do molde metálico tenham demonstrado uma rigidez ligeiramente superior (módulo de elasticidade 5,75% maior), a resistência a falhas e a ruptura sob carga foi positivamente influenciada pelo molde DLP. Tais diferenças são atribuídas à interação diferenciada entre o polímero e a superfície do molde impresso e ao comportamento de dissipação térmica do material polimérico, que influenciou a microestrutura final das peças.

No aspecto econômico, o estudo comprovou a competitividade da MA para a produção de ferramental de injeção: a redução drástica no custo de aquisição. A análise comparativa de custos revelou uma economia de 81% na confecção da cavidade DLP (R\$ 973,44) em relação ao molde convencional em aço 4043 (R\$ 5.000,00). A viabilidade econômica do ferramental aditivo mostrou-se majoritariamente dependente do custo dos insumos (resina e álcool), que corresponde a 76% do valor final, invertendo a lógica do ferramental convencional, onde a Mão de Obra e o tempo de usinagem são os fatores dominantes. No entanto, como limitação do estudo, destaca-se a ausência de avaliação da vida útil do molde ao longo de múltiplos ciclos de injeção, bem como a restrição do estudo a um único material polimérico. Estudos futuros podem explorar diferentes materiais e condições operacionais para ampliar a aplicabilidade dos resultados.

Em síntese, o Ferramental Rápido produzido por impressão 3D DLP mostrou-se uma alternativa tecnicamente robusta e economicamente viável para a fabricação de moldes de injeção, conforme evidenciado na Tabela 4, que apresenta a comparação entre o molde impresso e o molde metálico convencional. Além da expressiva redução de tempo e custo de fabricação, o molde polimérico garantiu o preenchimento da cavidade em condições seguras de processo e influenciou positivamente as propriedades mecânicas das peças injetadas. Os resultados quantitativos, fundamentados em estudos de caso e na literatura especializada,

indicam que os moldes fabricados por Manufatura Aditiva em resina BASF apresentam desempenho mecânico compatível — e, em alguns casos, superior — ao observado em moldes metálicos, consolidando a tecnologia DLP como uma solução de alto desempenho para a produção rápida de protótipos funcionais e de lotes de pequena e média escala.

Tabela 4 - Resumo Comparativo: Molde Metálico vs. Molde Aditivo (BASF)

Característica	Molde Metálico Convencional (Aço)	Molde Aditivo (BASF)
Custo de Fabricação da Cavidade	Alto (R\$ 5.000,00)	Baixo (R\$ 973,44)
Economia em Relação ao Metal	Referência	81% mais econômico
Fator Dominante do Custo	Mão de Obra, tempo de usinagem e EBM.	Custo dos Insumos (Resina e Álcool), correspondendo a 76% do valor
Condutividade Térmica do Molde	Alta	Baixa
Taxa de Resfriamento da Peça	Rápida (25 s)	Lenta (40 s)
Morfologia da Peça Injetada	Camadas-limite mais espessas e esferulitos pequenos	Camadas-limite mais finas e esferulitos maiores
Rigidez da Peça Injetada (Módulo de Elasticidade)	Maior (Média: 1305,00 MPa)	Menor (Média: 1230,00 MPa)
Resistência à Ruptura da Peça Injetada (Tensão de Ruptura)	Menor (Média: 45,77 MPa)	Maior (Média: 53,33 MPa)

Fonte: Os autores (2025).

Referências

ALMEIDA, Anderson Tadeu de Santi Barbosa de; SOUZA, Gustavo Braz de Cristo; BOTELHO, Vitor de Oliveira. Manufatura Aditiva de Materiais Metálicos: uma abordagem de produção centrada no cliente. **Revista Brasileira de Mecatrônica**, São Paulo, SP, v. 6, n. 4, p. 54-72, abr.-jun. 2024.

AMARAL, L. B. do; CONSONNI, C. R.; PASCHOA, J. L. F.; FORTULAN, C. A.; CARVALHO, J.; MAGALHÃES, D. V. Manufatura aditiva de cerâmica utilizando processamento de luz digital (DLP). In: **CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA**, 10., 2018, Salvador. Anais [...]. Salvador: [s.n.], 2018.

AMAZON.COM.BR. **Creality 3D UW-01 Máquina de Lavar e Curar 2 em 1 Balde de Caixa Rotativa de Cura UV para LCD/DLP/SLA Resina Modelos de Impressora 3D 3D 7.42x6x7.8 polegadas Transparente Visiblet.** [S.I.], [2025]. Disponível em:

< <https://www.amazon.com.br/Creality-3D-UW-01-Impressora-Transparente/dp/B08MWG156Y> >. Acesso em: 29 nov. 2025.

ANYCUBIC Photon Mono M5s 12K resin 3D printer, test and review after 1 month. Printer3d.one. [S.l.], [entre 10 e 16] nov. 2023. Disponível em: <https://www.printer3d.one/anycubic-photon-mono-m5s-12k-resin-3d-printer-test-and-review-after-1-month/>. Acesso em: 23 nov. 2025.

ASSIS, Marley Alisson Perdigão de. **Impressão 3D, modelos de negócios e os novos cenários para a propriedade intelectual.** 2018. 124 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica e Propriedade Intelectual) – Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

BASF ULTRACUR3D RG 3280. Filament2print.com. [S.l.], [2025]. Disponível em: <https://www.filament2print.com/eng/resins/eng/ultracur3d-rg-3280-white-1-kg-basf-forward-am>. Acesso em: 28 nov. 2025.

CORDEIRO, Erik. **Depreciação de máquinas e equipamentos: como calcular e reduzir.** Traction Blog. [S.l.], 19 nov. 2025. Disponível em: <https://traction.com/blog/depreciacao-de-maquinas-e-equipamentos-industriais>. Acesso em: 23 nov. 2025.

DIZON, J. R. C. et al. 3D printed injection molds using various 3D printing technologies. **Materials Science Forum**, v. 1005, p. 150–156, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1005.150>. Acesso em: 04 nov. 2025.

FERIOTTI, Marco Aurélio; MARCELINO, Davi de Medeiros; POHLMANN, Mayara Neves; NETO, José Martino; ROSA, Jorge Luiz. Aplicabilidade da Manufatura Aditiva e Impressão 3D na Manufatura Convencional de Moldes para Injeção de Termoplásticos. In: **ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**, 41., 2021, Foz do Iguaçu. Anais... [S.l.]: [s.n.], 2021.

FERIOTTI, M. A.; MARCELINO, D. de M.; POHLMANN, M. N.; NETO, J. M.; ROSA, J. L. Aplicações da manufatura aditiva e impressão 3d na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos. **Brazilian Journal of Production Engineering**, São Mateus, Espírito Santo, Brazil, v. 7, n. 3, p. 199–218, set. 2021. DOI: 10.47456/bjpe.v7i3.34567. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/bjpe/article/view/34567>. Acesso em: 12 ago. 2024.

FERNANDES, A.; ALMEIDA, C.; et al., **Supply Chain e o impacto da impressora 3D.** 2014. 82 f. MBA Engenharia e Gestão da Manufatura e Manutenção – USP, São Paulo, 2014.

FARIOLI, D. et al. **Rapid tooling for injection molding inserts.** ESAFORM 2021, 1 abr. 2021.

FRAGOSO, Michael Douglas Lima. **Desenvolvimento de impressora 3D com tecnologia Digital Light Processing (DLP).** 2019. [Número total de folhas não especificado] f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Eletricista) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

GARCIA, Mauro César Rabuski. **Fundamentos de projeto de ferramentas: moldes de injeção para termoplásticos**. Sapucaia do Sul: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense, Campus Sapucaia do Sul, 2009. 232 p. Apostila de curso.

GIORDANO, Caio M.; ZANCUL, Eduardo de S.; RODRIGUES, Vinícius P. Análise dos custos da produção por manufatura aditiva em comparação a métodos convencionais. **Revista Produção Online**, Florianópolis, SC, v. 16, n. 2, p. 499-523, abr./jun. 2016. DOI: 10.14488/1676-1901.v16i2.1963. ISSN 1676-1901.

KAMPKER, Achim et al. Direct polymer additive tooling – effect of additive manufactured polymer tools on part material properties for injection moulding. **Rapid Prototyping Journal**, [S.l.], v. 25, n. 10, p. 1575-1584, 2019.

MARQUES JUNIOR, Gastão Boccardi; COSTA, Carlos Alberto. 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. Disponível em: <https://sou.ucs.br/etc/revistas/index.php/scientiacumindustria/article/view/7170>. Acesso em: 3 nov. 2025.

PEREIRA, F. **Manufatura aditiva: barreiras e oportunidades para aplicação na indústria brasileira**. 2022. 96. Mestrado – Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 2022.

PROVENZA, Francesco. **Moldes para plásticos**. São Paulo: F. Provenza, 1991.

REIS, T. M. DOS. **Avaliação Tribológica do Tratamento de Nitretação a Plasma com Pós-Oxidação Aplicada em Sistema de Extração de Moldes para Injeção de Termoplásticos**. [s.l.] Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, 2017.

SARAIVA, P. A. da C. **Projeto de um molde de injeção**. Leiria, 2016.

SILVA, Maria de Fátima. Inovação disruptiva da impressão 3D no consumidor de moda. In: **CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA NA EDUCAÇÃO**, 2022, p. 1-8.

SOUZA, Ana Clara Souto de; BENATTI, Lia Paletta; MOTTIN, Artur Caron; DAVID, Eduardo Cassiano Santos. Aplicações da impressão 3D na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos: uma revisão da literatura. **Revista Sítio Novo**, Palmas, v. 9, p. e1802, 2025. DOI: 10.47236/2594-7036.2025.v9.1802. Disponível em: <https://sitionovo.ifto.edu.br/index.php/sitionovo/article/view/1802>. Acesso em: 3 nov. 2025.

STEWART C. B.; CHILES V.; Lisseman A.J.; MARTIN, S. J. Primary Forming Processes. **Principles of Engineering Manufacture**, v. 3, p. 13-67. 2007

VOLPATO, N. et al. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. 1ª ed. digital. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2018. 400 p.; PDF.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio recebido para execução das atividades de pesquisa das instituições: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG,

Universidade do Estado de Minas Gerais - UEMG, Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG (APQ-02274-23 / APQ-08595-25), Conselho Nacional do Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES.