

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM PROJETO E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Área de concentração: Projeto e Processos de Fabricação

Dissertação de Mestrado

AVALIAÇÃO DA IMPRESSÃO 3D METÁLICA NA
FABRICAÇÃO DE CAVIDADES EM AÇO H13 PARA MOLDES
PROTÓTIPOS DE INJEÇÃO PLÁSTICA

Gustavo Andre Vaccari

Passo Fundo

2024



Gustavo Andre Vaccari

**AVALIAÇÃO DA IMPRESSÃO 3D METÁLICA NA FABRICAÇÃO
DE CAVIDADES EM AÇO H13 PARA MOLDES PROTÓTIPOS DE
INJEÇÃO PLÁSTICA**

Orientador: Prof. Dr. Charles Leonardo Israel

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Passo Fundo
2024

CIP – Catalogação na Publicação

- V114a Vaccari, Gustavo Andre
Avaliação da impressão 3D metálica na fabricação de cavidades em aço H13 para moldes protótipos de injeção plástica [recurso eletrônico] / Gustavo Andre Vaccari. – 2024.
3 MB ; PDF.
- Orientador: Prof. Dr. Charles Leonardo Israel.
Dissertação (Mestrado em Projeto e Processos de Fabricação) – Universidade de Passo Fundo, 2024.
1. Aço H13 - Resistência. 2. Aço - Fadiga. 3. Impressão tridimensional. 4. Processos de fabricação. I. Israel, Charles Leonardo, orientador. II. Título.
- CDU: 621.9

Catalogação: Bibliotecária Jucelei Rodrigues Domingues - CRB 10/1569

Gustavo Andre Vaccari

**AVALIAÇÃO DA IMPRESSÃO 3D METÁLICA NA FABRICAÇÃO
DE CAVIDADES EM AÇO H13 PARA MOLDES PROTÓTIPOS DE
INJEÇÃO PLÁSTICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Data de aprovação: 11 de Setembro de 2024.

Os componentes da Banca examinadora abaixo aprovaram a Dissertação:

Professor Doutor Charles Leonardo Israel
Orientador

Professor Doutor William Haupt
Coorientador

Professora Doutora Aline Dettmer
Universidade de Passo Fundo

Professor Doutor Mauricio Rodrigues Policena
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense Campus Passo
Fundo

"No que diz respeito ao empenho, ao compromisso, ao esforço, à dedicação, não existe meio termo. Ou você faz uma coisa bem feita ou não faz."

Ayrton Senna.

AGRADECIMENTOS

À Universidade de Passo Fundo, expressei minha mais profunda gratidão por ter fornecido todo o apoio de pesquisa necessário para a realização desta dissertação. A infraestrutura e os recursos disponibilizados foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho, e o ambiente acadêmico proporcionado pela instituição foi fundamental para meu crescimento como pesquisador.

Ao meu orientador, Professor Doutor Charles Israel, deixo meu sincero agradecimento. Sua orientação foi crucial para direcionar minha pesquisa nos caminhos certos, possibilitando alcançar os objetivos propostos. Seu conhecimento, paciência e incentivo foram inestimáveis ao longo deste processo, e sou imensamente grato por todo o tempo e esforço dedicados.

À empresa parceira, meu agradecimento especial por ter fornecido toda a tecnologia e equipamentos necessários para estudar a aplicabilidade prática desta pesquisa. O apoio técnico e logístico oferecido pela empresa foi vital para o sucesso deste trabalho, permitindo a realização de experimentos e análises de alta qualidade.

A minha esposa, agradeço de coração pelo apoio e perseverança. Seu incentivo constante foi fundamental para que eu não perdesse o foco da pesquisa, mesmo diante das dificuldades de conciliar os estudos com o trabalho e a vida familiar. Sua compreensão, paciência e amor foram essenciais para que eu pudesse concluir esta etapa da minha vida acadêmica.

A todos, meu muito obrigado.

RESUMO

Esta dissertação avalia a viabilidade da utilização da impressão 3D metálica para a fabricação de cavidades de moldes protótipos de injeção plástica, utilizando aço H13 e o processo de manufatura ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing). O objetivo central foi analisar as propriedades mecânicas e estruturais do aço H13 impresso, o desempenho do molde em testes de injeção e o comparativo de custo e tempo em relação aos métodos convencionais de usinagem. Foram realizados ensaios de microdureza e tração, que indicaram que o aço H13 fabricado por ADAM apresenta propriedades consistentes e adequadas para aplicações industriais, com composição química similar à versão comercial, além de elevada resistência mecânica e comportamento semi-dúctil. O molde impresso demonstrou viabilidade prática no processo de injeção plástica, produzindo peças de qualidade e mantendo boa integridade ao longo dos ciclos de injeção. A análise de custo e tempo mostrou que, embora a manufatura aditiva possua um custo inicial mais elevado, sua execução mais rápida para peças complexas pode justificar o investimento em contextos de prototipagem. Este trabalho contribui para o avanço da manufatura aditiva no setor industrial, sugerindo que a impressão 3D com aço H13 oferece uma alternativa viável para moldes de injeção protótipos, especialmente onde há necessidade de agilidade no desenvolvimento. Estudos futuros poderão explorar outras ligas metálicas e melhorias no pós-processamento para otimizar a aplicabilidade da tecnologia.

Palavras-chave: impressão 3D metálica; aço H13; moldes de injeção; manufatura aditiva; ADAM.

ABSTRACT

This dissertation evaluates the feasibility of using metal 3D printing for the fabrication of prototype injection mold cavities, employing H13 steel and the Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM) process. The primary objective was to analyze the mechanical and structural properties of ADAM-printed H13 steel, the mold's performance in injection tests, and a cost and time comparison with conventional machining methods. Hardness and tensile tests indicated that H13 steel produced by ADAM demonstrates consistent and suitable properties for industrial applications, with a chemical composition similar to commercially available H13, as well as high mechanical strength and semi-ductile behavior. The printed mold proved to be practically viable in the plastic injection process, producing high-quality parts and maintaining good integrity over repeated injection cycles. The cost and time analysis showed that while additive manufacturing has a higher initial cost, its faster execution for complex parts can justify the investment, particularly in prototyping contexts. This study contributes to the advancement of additive manufacturing in the industrial sector, suggesting that 3D printing with H13 steel provides a viable alternative for prototype injection molds, especially when agility in development is critical. Future studies could explore other metallic alloys and improvements in post-processing to enhance the technology's applicability.

Keywords: metal 3D printing; H13 steel; injection molds; additive manufacturing; ADAM.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1: Esquema ilustrativo do método DMLS..... | 18 |
| Figura 2: Esquema ilustrativo do método EBM. | 19 |
| Figura 3: Esquema ilustrativo do método SLM. | 19 |
| Figura 4: Etapas de impressão da tecnologia ADAM. | 20 |
| Figura 5: Representação de um molde de injeção plástica..... | 22 |
| Figura 6: Representação de um par de cavidades de injeção plástica. | 23 |
| Figura 7: Representação de um ciclo de injeção plástica. | 25 |
| Figura 8: Exemplo de cavidades de um molde de injeção completo..... | 26 |
| Figura 9: Representação de um sistema de refrigeração conformal..... | 27 |
| Figura 10: Fluxograma das principais etapas da dissertação..... | 29 |
| Figura 11: Representação da cavidade de injeção com refrigeração integrada. | 31 |
| Figura 12: Porta-moldes: a) vista explodida; b) vista montado..... | 32 |
| Figura 13: Representação dos corpos de prova e orientação de impressão..... | 33 |
| Figura 14: Preparação da peça para impressão 3D..... | 35 |
| Figura 15: Sobreposição das malhas escaneadas sob o projeto 3D da cavidade. | 37 |
| Figura 16: Corpos de prova: representação da geometria superfície e coloração dos corpos de prova fabricados por ADAM. | 39 |
| Figura 17: Comportamento da Tensão e Deformação de 3 corpos de prova fabricados em aço H13 por ADAM. | 43 |
| Figura 18: Mapa geral da análise da fratura de um corpo de prova de aço H13 obtido por ADAM: (a) visão geral da fratura mostrando a morfologia, (b) visão ampliada da zona b em (a), (c) vista ampliada da zona c em (b) mostrando a existência e característica de microporos e vazios representativos introduzidos pela sinterização, (d) vista ampliada da zona d em (a), (e) vista ampliada da zona e em (d) mostrando a trinca introduzida pela impressão, (f) vista ampliada da zona f em (c)..... | 45 |
| Figura 19: (a) microestrutura óptica representada em 3D, (b) microscopia óptica ampliada (zona b) evidenciando o tamanho de grãos da amostra, (c) mapa da distribuição elementar de junções triplas de contornos de grão de ferrita..... | 46 |
| Figura 20: Mapa geral de EDS apresentando a distribuição dos elementos constituintes da composição do aço H13..... | 47 |
| Figura 21: Cavidade impressa em 3D montada ao porta-moldes..... | 48 |
| Figura 22: Cavidade de extração montada ao morta-molde. | 48 |
| Figura 23: Amostra dos produtos injetados..... | 49 |
| Figura 24: a) Ilustração da cavidade após primeiro <i>tryout</i> . b) escaneamento 3D da cavidade após 100 ciclos. | 51 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Propriedades mecânicas aço H13 obtido por impressão 3D..... | 31 |
| Tabela 2: Etapas de fabricação do processo ADAM..... | 36 |
| Tabela 3: Principais parâmetros de injeção | 38 |
| Tabela 4: Composição química do aço H13 obtido por ADAM. | 40 |
| Tabela 5: Resultados dos Ensaios de Microdureza <i>Vickers</i> | 40 |
| Tabela 6: Médias e Desvios Padrão das Direções Analisadas..... | 41 |
| Tabela 7: Resultados do Teste de <i>Tukey</i> | 41 |
| Tabela 8: Resultados dos Ensaios de Tração..... | 42 |
| Tabela 9: Médias e Desvios Padrão dos Ensaios de Tração..... | 42 |
| Tabela 10: Resultados do Teste de <i>Tukey</i> da Tensão e Deformação..... | 43 |
| Tabela 11: Medidas do diâmetro externo das amostras injetadas. | 52 |
| Tabela 12: Análise estatística <i>Shapiro-Wilk</i> | 52 |
| Tabela 13: Análise estatística Teste t. | 53 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------|---|
| 3D | Tridimensional |
| SLS | Sinterização Seletiva a Laser |
| SLM | Fusão Seletiva a Laser |
| DED | Deposição Direta de Energia por Laser |
| DMSL | Sinterização Direta a Laser |
| EBM | Impressão por Feixe de Elétrons |
| SLM | Ligação de Metal a Laser |
| ADAM | Manufatura Aditiva por Difusão Atômica do Aço |
| H13 | Sigla para aço de alta tenacidade |
| EPI | Equipamentos de Proteção Individuais |

SUMARIO

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 | OBJETIVOS | 14 |
| 1.1.1 | Objetivo geral | 14 |
| 1.1.2 | Objetivos específicos | 14 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 16 |
| 2.1 | PRINCÍPIOS DA MANUFATURA ADITIVA (MA) | 16 |
| 2.2 | VISÃO GERAL DA IMPRESSÃO 3D METÁLICA..... | 16 |
| 2.3 | MATERIAIS PARA IMPRESSÃO 3D METÁLICA | 20 |
| 2.4 | CONCEITO DE MOLDES DE INJEÇÃO | 21 |
| 2.5 | CAVIDADE DE INJEÇÃO IMPRESSA EM 3D | 25 |
| 2.5.1 | Parâmetros de impressão e pós-processamento | 27 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 29 |
| 3.1 | REQUISITOS DE PROJETO | 30 |
| 3.2 | MODELAGEM 3D DA CAVIDADE DE INJEÇÃO..... | 30 |
| 3.3 | MATERIAL DE IMPRESSÃO..... | 31 |
| 3.4 | PROJETO DO MOLDE | 32 |
| 3.5 | FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA | 33 |
| 3.5.1 | Ensaios mecânicos | 34 |
| 3.5.2 | Análises microestruturais | 34 |
| 3.6 | FABRICAÇÃO DA CAVIDADE IMPRESSA | 34 |
| 3.7 | ESCANEAMENTO DA CAVIDADE IMPRESSA | 37 |
| 3.8 | PÓS-PROCESSAMENTO DA CAVIDADE | 37 |
| 3.9 | INJEÇÃO PLÁSTICA | 38 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 39 |
| 4.1 | MORFOLOGIA E MICROESTRUTURA DO AÇO H13..... | 39 |
| 4.1.1 | Rugosidade e topografia da superfície | 39 |
| 4.1.2 | Propriedades de Dureza | 40 |
| 4.1.3 | Análise dos Ensaios de Tração e Comportamento de Fratura | 42 |
| 4.1.4 | Caracterização Microestrutural..... | 45 |
| 4.2 | MONTAGEM DO MOLDE | 47 |
| 4.3 | TESTE DE REFRIGERAÇÃO DA CAVIDADE | 49 |
| 4.4 | TESTE DE INJEÇÃO PLÁSTICA | 49 |
| 4.5 | DESEMPENHO DA CAVIDADE IMPRESSA..... | 50 |
| 4.6 | AVALIAÇÃO DO PRODUTO INJETADO..... | 51 |
| 4.7 | COMPARATIVO DE CUSTOS X TEMPO..... | 54 |
| 5 | CONCLUSÕES..... | 55 |
| 6 | REFERÊNCIAS | 57 |

1 INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva possui vantagens notáveis que possibilitam desenvolvimentos sustentáveis na área de aplicação (HORST, 2018; NYAMEKYE et al., 2024). Dentre as muitas vantagens da manufatura aditiva, algumas características se destacam como o baixo desperdício de matéria-prima, podendo em alguns casos ser reaproveitado, a versatilidade de formas distintas podendo ser fabricadas ao mesmo tempo, desfrutar de uma liberdade criativa visando o modelamento e a estrutura do objeto (AHMED et al., 2024; DEBROY et al., 2018a; NGO et al., 2018). O avanço da tecnologia possibilitou que os materiais metálicos e seus processos de adição metálica por impressão 3D possuam propriedades similares ou até mesmo superiores em comparação a peças fabricadas pelos processos tradicionais (ATHALE et al., 2023; GIBSON, 2015).

Os dados mais recentes sobre o mercado de manufatura aditiva indicam que ele está em forte crescimento, com uma taxa composta de crescimento anual (CAGR) entre 20,6% e 22,3% até 2028 (“Additive Manufacturing Market: Global Analysis and Forecast”, 2024). Em 2023, o mercado foi estimado em aproximadamente US\$ 16,14 bilhões, e deve atingir US\$ 19,74 bilhões em 2024, com a expectativa de chegar a US\$ 41,69 bilhões em 2028 (“Additive Manufacturing Global Market Report 2024”, 2024).

Esse crescimento é impulsionado principalmente pela demanda por customização, avanços em biotecnologia e impressão de dispositivos médicos, além da crescente adoção no setor aeroespacial e automotivo. A integração com processos de manufatura tradicionais e a inovação contínua em materiais também são fatores determinantes para esse avanço. As indústrias de saúde e defesa, em particular, têm sido grandes impulsionadoras dessa expansão, devido à capacidade da manufatura aditiva de produzir geometrias complexas e componentes personalizados a custos mais baixos (“Additive Manufacturing Market Size Report, 2030”, 2024).

Na indústria o aço H13 é um dos aços que possui maiores aplicações distintas, dentre sua vasta utilização esse aço se destaca nas cavidades de moldes e matrizes devido a sua elevada resistência ao desgaste (ÅSBERG et al., 2019). Tendo em vista que os moldes e matrizes são na maioria das vezes exclusivos, possuindo produção limitada e personalizada, é lógico pensar que a manufatura aditiva metálica é uma boa opção para o processo de fabricação (FERIOTTI et al., 2021).

As cavidades de moldes para injeção protótipo fabricadas por impressão 3D metálica têm despertado interesse como uma alternativa promissora para a fabricação de moldes para peças plásticas. A fabricação aditiva permite a produção rápida de cavidades de moldes, reduzindo significativamente o tempo de produção em comparação com os métodos convencionais, isso proporciona uma maior agilidade no desenvolvimento de produtos e uma resposta mais rápida às demandas do mercado (SADAF et al., 2024; SRIVASTAVA et al., 2022). Moldes fabricados por impressão 3D metálica com canais de refrigeração integrados podem reduzir os tempos de ciclo em até 50% e melhorar a qualidade das peças em comparação com moldes convencionais (SHINDE, 2017; WANG, 2023).

Nesse contexto, esta dissertação avaliou a aplicabilidade prática de uma cavidade de molde protótipo para injeção plástica fabricada por impressão 3D metálica obtida através do processo ADAM (manufatura aditiva por difusão atômica) e analisou as vantagens, desafios e limitações do uso desse tipo de manufatura em um ambiente de produção real. Foram considerados fatores como variância e desvio padrão das dimensões das peças produzidas e desempenho em termos de ciclos de produção.

Esta pesquisa contribui para o avanço do conhecimento na área de fabricação aditiva e moldagem por injeção, fornecendo informações valiosas sobre a aplicação prática de moldes com cavidades de injeção protótipo fabricadas por impressão 3D metálica. Os resultados beneficiam empresas e indústrias que buscam aumentar a eficiência, reduzir custos e melhorar a qualidade na produção de peças plásticas substituindo as manufaturas tradicionais pelas inovadoras.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Analisar a viabilidade de um molde protótipo com cavidade de injeção plástica fabricada por impressão 3D metálica.

1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar o aço H13 obtido pelo processo de impressão 3D metálica ADAM;

- Realizar testes de ciclagem do molde de injeção analisando sua capacidade de suportar ciclos de injeção repetidos;
- Realizar inspeção dimensional dos produtos oriundos do processo de injeção;
- Comparar o custo de fabricação aditiva com métodos tradicionais de usinagem.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na área da fabricação aditiva e processos industriais, é de grande relevância a avaliação da aplicabilidade prática desta manufatura. Ao realizar uma revisão bibliográfica sobre esse assunto, é possível abordar diversos tópicos.

2.1 Princípios da Manufatura Aditiva (MA)

A fabricação aditiva, também conhecida como impressão 3D, é um processo que permite a criação de objetos tridimensionais por meio da deposição de camadas sucessivas de material. Alguns princípios básicos orientam a fabricação aditiva, tal como a criação de geometrias complexas que seriam difíceis ou impossíveis de serem produzidas pelos métodos tradicionais. (AL RASHID, 2023; GIBSON, 2015; LAKSHMANAN et al., 2023). O *design* (modelagem 3D) é um aspecto fundamental da fabricação aditiva, pois o projetista pode explorar a liberdade do projeto e otimizar a forma dos objetos para melhorar o desempenho (DJOKIKJ, 2022; NYAMEKYE et al., 2024; THOMPSON et al., 2016). Existem diversos tipos de materiais disponíveis, como polímeros, metais, cerâmicas, entre outros. Cada material possui propriedades específicas que afetam a resistência, durabilidade e funcionalidade do objeto. É importante garantir o controle preciso da deposição de material. Isso inclui o controle da temperatura, velocidade de impressão, pressão e outras variáveis (HAJARE, 2022; KANISHKA, 2023; NAZIR et al., 2023). O controle adequado do processo é essencial para evitar defeitos e obter a qualidade desejada no objeto fabricado (HUANG et al., 2015; PEREIRA, 2023).

Após a impressão 3D, é necessário realizar etapas adicionais de pós-processamento para melhorar a aparência, a resistência ou outras propriedades do objeto fabricado. O pós-processamento pode envolver limpeza, lixamento, polimento, tratamentos térmicos, entre outros procedimentos, para alcançar as características finais desejadas (GIBSON, 2015; SANGUEDOLCE et al., 2021).

2.2 Visão geral da impressão 3D metálica

A impressão 3D metálica é uma técnica avançada de fabricação aditiva que permite a produção de peças metálicas complexas com alta precisão e qualidade. Camadas sucessivas de material metálico são depositadas e fundidas juntas para formar o objeto

final. A impressão 3D metálica tem ganhado destaque devido às suas diversas aplicações industriais, como na fabricação de peças aeroespaciais, componentes automotivos e implantes médicos (ALFAIFY et al., 2020; KANISHKA, 2023; KANYILMAZ et al., 2022).

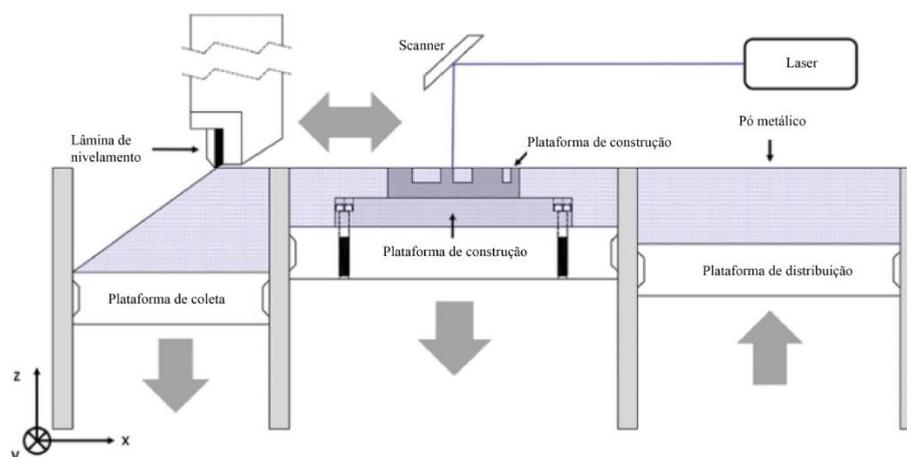
A impressão 3D metálica permite a utilização de uma ampla gama de materiais metálicos, incluindo ligas de titânio, alumínio, aço inoxidável e aços ferramenta. Cada material possui características específicas de resistência, durabilidade e condutividade térmica. A seleção do material adequado é crucial para obter propriedades mecânicas desejadas nas peças impressas (GARDNER, 2023; VANDENBROUCKE, 2007).

A principal preocupação com a manufatura aditiva em metais é a anisotropia trazida pelo gradiente de temperatura resultante da adição de camadas sucessivas, se analisarmos a microestrutura de um aço fabricado por Fusão Seletiva a Laser (SLM), o processo pioneiro da impressão metálica, veremos que é diferente do aço convencional (MONTUORI et al., 2020; YANG et al., 2024). Tomando-a como exemplo, uma vez que é uma técnica de manufatura aditiva que consiste em um leito de pó fundido por laser, a microestrutura do H13 impresso geralmente consiste em bandas alternadas de martensita e martensita temperada, alinhadas perpendicularmente à direção de construção. Isso se deve aos efeitos de refusão e reaquecimento do feixe de laser quando as regiões adjacentes são escaneadas (CARROLL, 2015; OLIVEIRA et al., 2023; WEN et al., 2023). Pensando nisso, a empresa Markforged Inc. desenvolveu a máquina “Metal X” que combina a moldagem por injeção de metal (MIM) à fabricação por filamento fundido (FFF), dando origem ao processo conhecido como Manufatura Aditiva por Difusão Atômica (ADAM) (BOUAZIZ et al., 2021; GONG et al., 2021; SINGH et al., 2021), afirmando que as peças produzidas por este método são livres de anisotropia devido à fusão controlada durante o processo de sinterização, resultando em propriedades similares às de um aço normalizado (BOUAZIZ et al., 2020; PELLEGRINI, 2024).

Existem várias tecnologias de impressão 3D metálica, aplicáveis à fabricação de cavidades de injeção plástica, cada uma com suas características e benefícios específicos (ADEKANYE et al., 2017; PELIN, 2024). Cada tecnologia possui diferentes processos de impressão capazes de produzir ferramentas, onde se diferem nas técnicas de deposição e fusão do material metálico, cada processo tem suas próprias vantagens e desafios técnicos (DEBROY et al., 2018; KHARAT et al., 2023).

Sinterização a Laser Direta (DMLS): A DMLS (Figura 1) é uma técnica popular de impressão 3D metálica que utiliza um laser para fundir camadas sucessivas de pó metálico. Essa tecnologia oferece a capacidade de produzir moldes com alta complexidade geométrica e detalhes finos. DMLS é uma técnica eficiente para a fabricação de moldes, permitindo a produção direta de peças metálicas altamente precisas e funcionalmente viáveis (LI et al., 2020; THUIS et al., 2010).

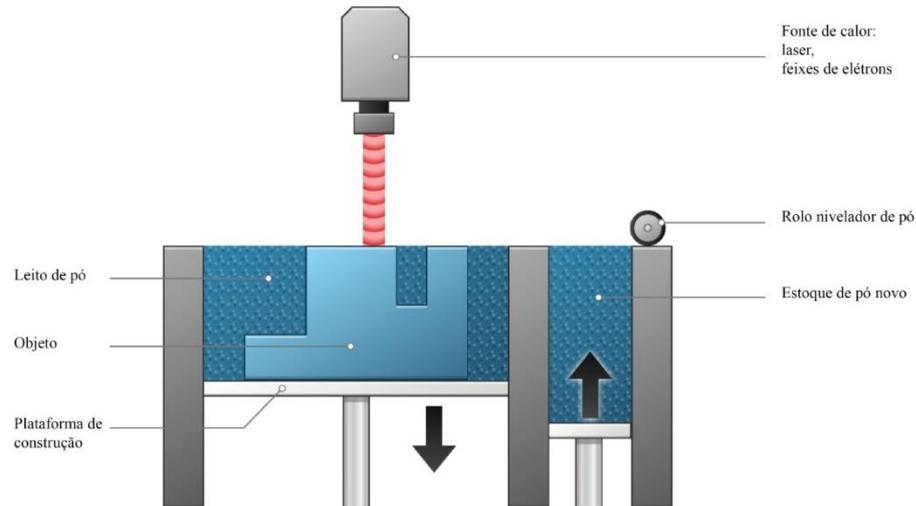
Figura 1: Esquema ilustrativo do método DMLS.



Fonte: Adaptado de ROCHA (2023).

Impressão por Feixe de Elétrons (EBM): A EBM (Figura 2) é outra tecnologia de impressão 3D metálica que utiliza um feixe de elétrons para fundir o pó metálico, camada por camada. Essa técnica é conhecida por sua alta taxa de deposição e a capacidade de produzir peças com excelente densidade. EBM é uma tecnologia adequada para a fabricação de moldes de injeção, permitindo a produção de canais de refrigeração integrados, o que resulta em uma melhor eficiência do resfriamento e ciclos de produção mais rápidos (GOKULDOSS, 2017; VENUKUMAR et al., 2023).

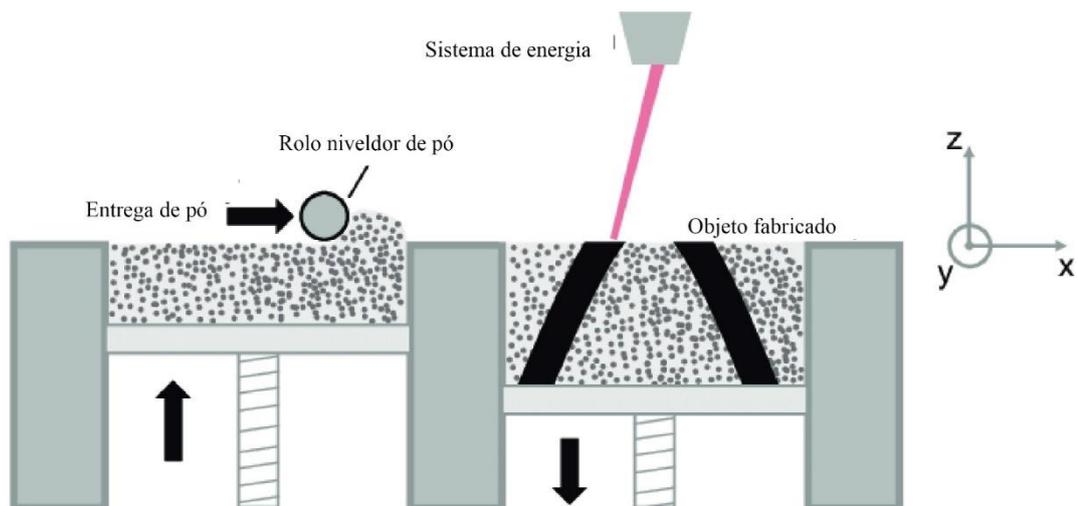
Figura 2: Esquema ilustrativo do método EBM.



Fonte: Adaptado de “Make : 3D printing CNC Machine Injection Molding - Dassault Systèmes®” (2018).

Impressão 3D por Ligação de Metal (SLM): A tecnologia de SLM (figura 3) é uma variante da impressão 3D metálica que utiliza um processo de ligação de metal para unir partículas metálicas. Essa técnica é conhecida por sua versatilidade e pela possibilidade de utilizar uma ampla variedade de materiais metálicos. A impressão 3D por ligação de metal é uma tecnologia emergente que oferece vantagens na fabricação de moldes, permitindo a produção de canais de refrigeração internos altamente complexos e personalizados (GOKULDOSS, 2017; MOSTAFAEI et al., 2021).

Figura 3: Esquema ilustrativo do método SLM.



Fonte: Adaptado de WIBERG (2019).

Manufatura Aditiva por Difusão Atômica do Aço (ADAM): Utiliza a deposição de material em pó metálico combinada com um processo de sinterização controlada para produzir peças metálicas com alta densidade e resistência. O processo envolve a deposição camada por camada de um pó metálico fino, que é compactado em seguida. Após a peça é aquecida para promover a difusão atômica entre as partículas de pó, resultando em uma consolidação completa das camadas e na obtenção de propriedades metálicas adequadas. As etapas deste processo estão ilustradas na Figura 4.

Figura 4: Etapas de impressão da tecnologia ADAM.



Fonte: Adaptado de MARKFORGED (2024).

2.3 Materiais para impressão 3D metálica

A escolha do material depende das características desejadas, como resistência, condutividade térmica, resistência à corrosão e outras propriedades mecânicas. Alguns dos materiais comumente utilizados na impressão 3D metálica de moldes incluem aço inoxidável, titânio e aço ferramenta, cada um com suas características únicas (KRIZSMA, 2023; MESQUITA, 2016).

Aço Inoxidável: O aço inoxidável é um dos materiais mais utilizados na impressão 3D metálica devido à sua resistência, durabilidade e boa condutividade térmica. Ele é adequado para aplicações que exigem alta resistência à corrosão e temperaturas elevadas. O aço inoxidável impresso em 3D apresenta propriedades mecânicas comparáveis as do aço convencional, tornando-o uma opção viável para a fabricação de moldes (BARRIONUEVO et al., 2024; HUANG, 2019; LIVERANI et al., 2017).

Titânio: O titânio é outro material amplamente utilizado na impressão 3D metálica. Ele oferece uma excelente relação resistência-peso, alta resistência à corrosão e biocompatibilidade. O titânio impresso em 3D é utilizado em várias aplicações, desde moldes de injeção até dispositivos médicos. A impressão 3D de titânio permite a fabricação de moldes com geometrias complexas e canais de refrigeração conformais, melhorando a eficiência de resfriamento e reduzindo o tempo de ciclo (RAFI et al., 2013; RAN et al., 2020; VAYSSETTE et al., 2018).

Aços Ferramenta: O aço Ferramenta é um dos materiais mais utilizados na impressão 3D metálica de moldes devido à sua resistência. É um aço de trabalho a quente, conhecido por sua alta tenacidade, resistência ao choque térmico e capacidade de retenção de dureza em altas temperaturas. O aço H13 exibe excelente resistência ao desgaste e possui boa capacidade de suportar tensões térmicas durante o processo de injeção (WENCHANG, 2023). É também conhecido por sua elevada dureza, alcançada por meio da adição de elementos de liga, como carbono, cromo, tungstênio e vanádio. Esses elementos ajudam a aumentar a resistência ao desgaste e a capacidade de corte da ferramenta (MUHAMMED et al., 2023; OLIVEIRA et al., 2021).

2.4 Conceito de moldes de injeção

A indústria de moldagem por injeção de plástico é amplamente reconhecida por sua contribuição significativa em uma variedade de setores, fornecendo componentes essenciais para produtos cotidianos (GOKTAS, 2020).

Os moldes são componentes essenciais no processo de moldagem por injeção, que é um dos principais métodos de fabricação utilizado na indústria para a produção em massa de peças plásticas (BARBOSA, 2018). Nesse processo, o material fundido é injetado em um molde, onde ele é resfriado e solidificado, resultando na forma desejada da peça. O conceito dos moldes de injeção baseia-se na criação de uma cavidade com a geometria exata da peça a ser produzida. Essa cavidade é formada por duas metades do molde, conhecidas como "parte fixa" e "parte móvel", que se encaixam perfeitamente (HARADA, 2004; KAZMER, 2022a).

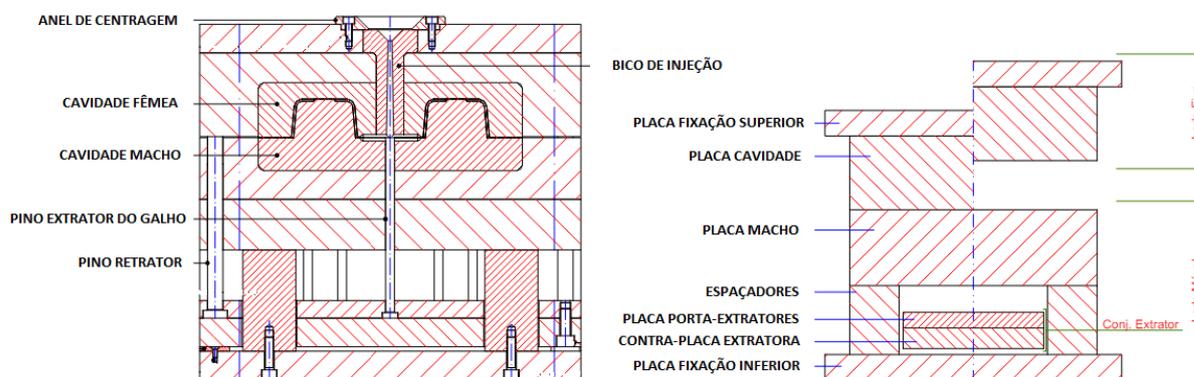
Um aspecto muitas vezes subestimado na produção de molde porta-moldes é a necessidade de atender às normas técnicas estabelecidas. Normas como a ISO

20400:2017 fornecem diretrizes para a sustentabilidade na aquisição de bens, incluindo componentes industriais, enquanto a norma ISO 9001:2015 é fundamental para a garantia da qualidade (ISO, 2015, 2017). Tais regulamentações desempenham um papel crucial na padronização e garantia de que os porta-moldes atendam aos requisitos essenciais de segurança e qualidade da indústria.

O porta-moldes padrão é geralmente feito de aço ou alumínio, e possui uma estrutura sólida e resistente. Ele é projetado com medidas e características padronizadas, permitindo que os fabricantes criem moldes específicos para diferentes produtos utilizando o mesmo porta-moldes como base (GARCIA, 2009). Esse tipo de molde possui canais e cavidades que servem para guiar o fluxo de material plástico durante o processo de injeção. Além disso, o porta-moldes padrão geralmente possui espaços vazios para a instalação de elementos como pinos, insertos e sistemas de extração, necessários para a formação das peças (BARBOSA, 2018; CZEPIEL, 2023; KAZMER, 2022).

A Figura 5 ilustra uma estrutura representativa de um molde porta-moldes de duas placas, que é o tipo mais básico de molde. Esse molde é composto por duas partes: a fixa, também conhecida como lado da injeção, que inclui a placa base superior e a placa porta cavidades; e a móvel, também chamada de lado da extração, que consiste na placa porta cavidades, placa suporte, calços ou espaçadores, placa base inferior, placa porta extratores e placa impulsora. Essa estrutura é apenas um exemplo, sendo que os moldes podem variar em complexidade e número de componentes, dependendo das necessidades específicas de cada projeto (GARCIA, 2009).

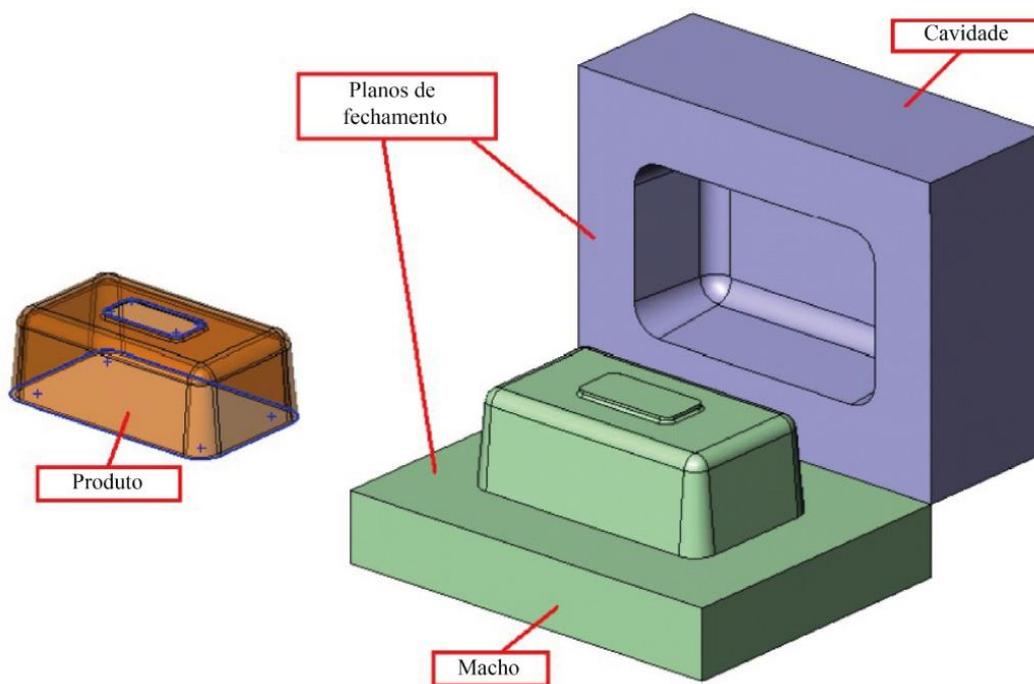
Figura 5: Representação de um molde de injeção plástica.



Fonte: Adaptado de GARCIA (2009).

Na placa porta-cavidades superior, ou em um inserto montado nessa placa, é realizada a usinagem da cavidade, que corresponde à parte fêmea do molde e define a forma externa da peça a ser produzida. Já na placa porta-cavidades inferior, ou em um inserto montado nessa placa, é usinada a parte macho do molde, que define a forma interna da peça. É importante ressaltar que a cavidade e o macho podem ser localizados tanto na parte fixa quanto na parte móvel do molde, embora seja mais comum a configuração descrita em que a cavidade está na parte fixa e o macho na parte móvel. Essa configuração facilita a extração das peças. Os calços ou espaçadores são utilizados para definir o espaço necessário aos movimentos do sistema de extração e podem contribuir para a altura mínima exigida pelo molde na máquina em que será montado. Para garantir a rigidez do conjunto, as placas devem ser aparafusadas e alinhadas entre si, formando as partes necessárias para o tipo específico de molde em questão (CECHMÁNEK et al., 2023; GARCIA, 2009). A representação de um par de cavidades de injeção pode ser visualizada na Figura 6.

Figura 6: Representação de um par de cavidades de injeção plástica.



Fonte: Adaptado de GARCIA (2009).

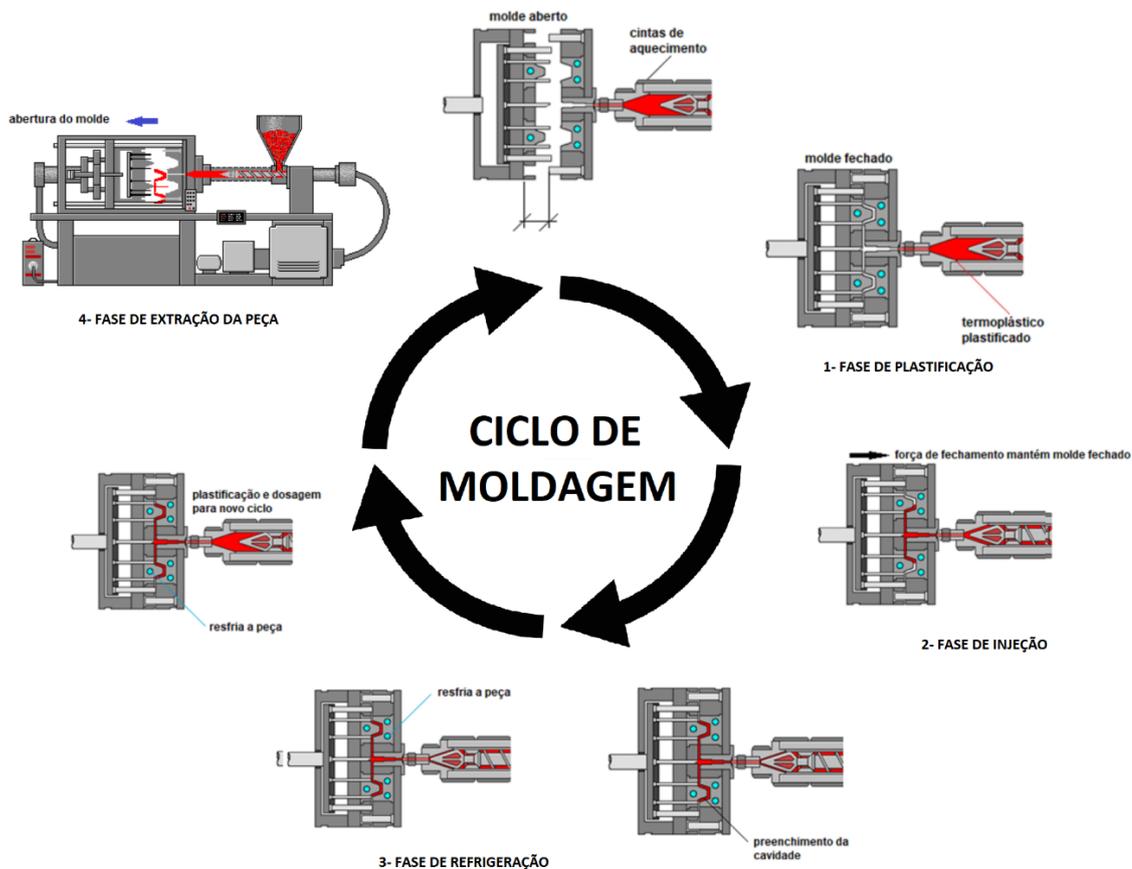
É crucial compreender os principais elementos que compõem um molde de injeção plástica, pois sua eficiência e desempenho estão diretamente relacionados à qualidade e precisão das peças produzidas (PARK et al., 2020). A cavidade e o núcleo

formam o centro do molde, representando a forma desejada da peça final e o espaço para o plástico fluir, respectivamente. O sistema de alimentação guia o plástico fundido para a cavidade por meio de canais estrategicamente projetados. O sistema de resfriamento, utilizando canais e fluidos refrigerantes, controla a temperatura durante a solidificação do plástico. Mecanismos de ejeção, como pinos e placas móveis, facilitam a remoção suave da peça moldada após a solidificação. As placas de base e de fixação sustentam e mantêm os componentes alinhados, enquanto guias de coluna e buchas guia asseguram o alinhamento preciso entre as metades do molde (KAZMER, 2022b).

A fabricação de moldes de injeção para peças plásticas envolve a seleção criteriosa de materiais que influenciam diretamente a eficiência do processo. Aços para ferramentas, como P20, H13 e S7, são comuns devido à sua alta resistência ao desgaste e durabilidade. O alumínio, por sua leveza e condutividade térmica, é amplamente utilizado em moldes para prototipagem e produção em pequena escala. Ligas de magnésio, apesar de menos frequentes, são exploradas em aplicações específicas que demandam redução de peso. Ligas de cobre-berílio, devido à sua alta condutividade térmica e resistência à corrosão, são ideais para moldes que necessitam maior dissipação de calor (CZEPIEL, 2023).

O funcionamento dos moldes de injeção envolve 4 fases. Primeiramente, as duas metades do molde são fechadas e travadas, formando a cavidade onde o material será injetado (fase 1), em seguida o material plástico, geralmente na forma de grânulos ou pellets, é aquecido e fundido em um cilindro aquecido. O material fundido é então injetado na cavidade do molde sob alta pressão por meio de um sistema de injeção (fase 2), que é composto por um pistão que empurra o material para dentro do molde. Após o preenchimento, o material é resfriado para solidificar e adquirir a forma da peça (fase 3). Isso é feito por meio de canais de refrigeração no molde, que permitem a circulação de fluidos refrigerantes. O resfriamento adequado é crucial para garantir a qualidade e as propriedades da peça moldada, além de influenciar o tempo de ciclo do processo. Após o resfriamento, o molde é aberto e a peça moldada é ejetada do molde (fase 4). Isso geralmente é feito por meio de pinos de extração, que empurram a peça para fora da cavidade do molde. O processo completo ocorre em poucos segundos e está ilustrado na Figura 7 (BARBOSA, 2018; GARCIA, 2009; HARADA, 2004).

Figura 7: Representação de um ciclo de injeção plástica.

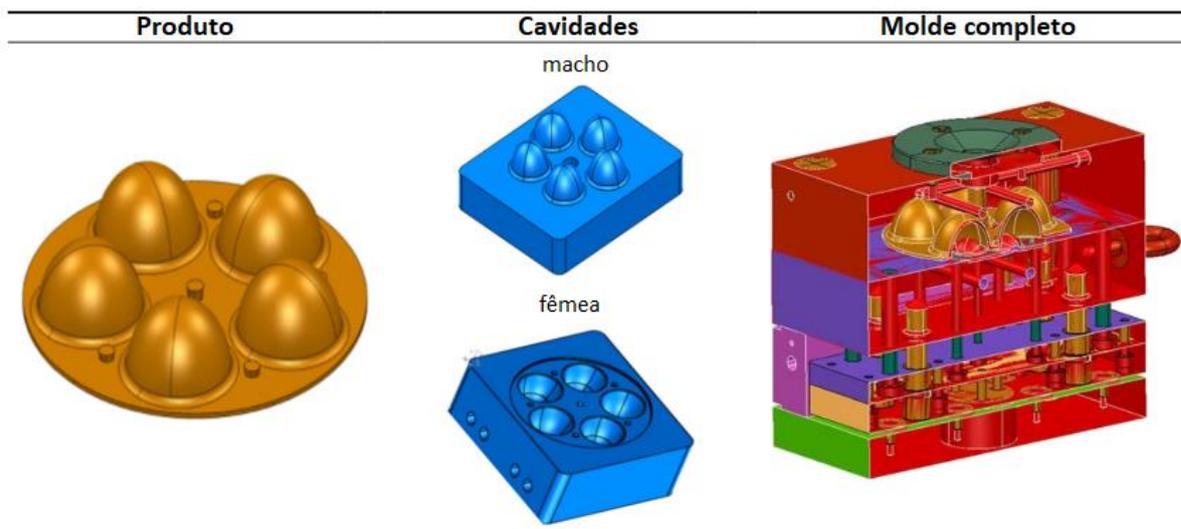


Fonte: Adaptado de (COSTA, 2021).

2.5 Cavidade de injeção impressa em 3D

Os custos de materiais e equipamentos de impressão 3D podem ser mais elevados em comparação aos métodos convencionais. Os custos de fabricação de uma cavidade impressa em 3D metálica pode ser 50% maior em comparação com a manufatura subtrativa convencional (FERIOTTI et al., 2021). No entanto, o mesmo autor afirma que o processo de manufatura aditiva pode ser 60% mais rápido que o convencional. Contudo, é inviável fabricar moldes completos para injeção plástica, tendo em vista que para geometrias simples se torna mais vantajoso e barato fazer uso de processos convencionais, explorando assim a manufatura aditiva apenas para alguns componentes do molde (Figura 8), partes complexas que não são intercambiáveis tais como as cavidades que dão forma ao produto (DIZON et al., 2020; MONFARED et al., 2023; NAZIR et al., 2023; PELIN, 2024).

Figura 8: Exemplo de cavidades de um molde de injeção completo.

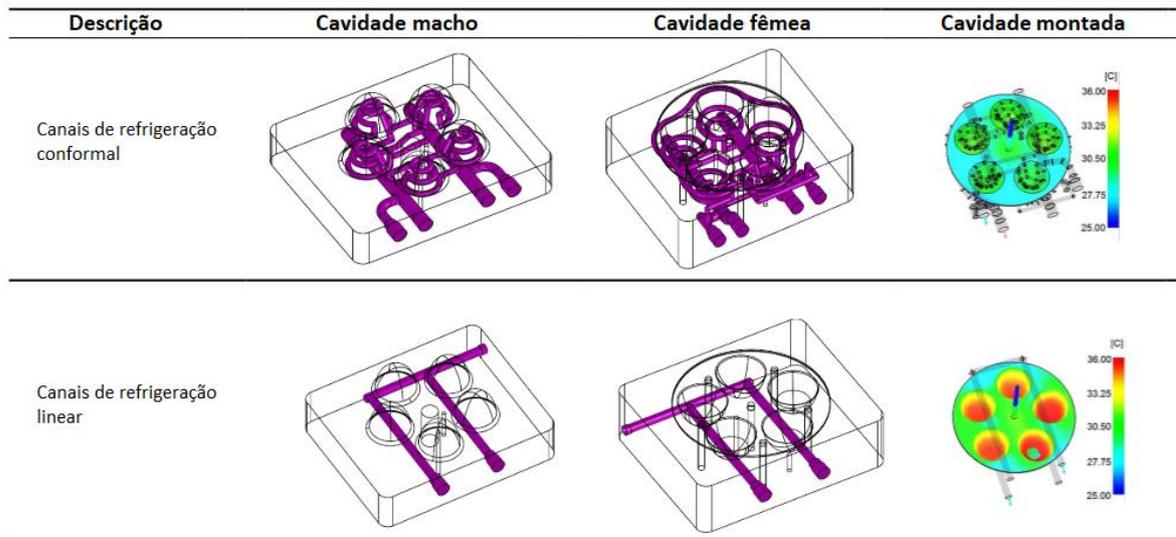


Fonte: Adaptado de MARQUES et al. (2015).

Os canais de refrigeração em moldes de injeção plástica são fundamentais para controlar a temperatura durante o processo de fabricação e garantir a qualidade do produto final. Existem diferentes tipos de canais que podem ser usados, dependendo do design do molde e das necessidades de resfriamento. Os canais convencionais são retos e perfurados diretamente no molde, sendo simples e de baixo custo, mas podem não fornecer uma refrigeração uniforme para geometrias complexas. Já os canais conformados (ou conformais) seguem a forma da cavidade do molde, proporcionando uma melhor eficiência de resfriamento, já que mantêm uma proximidade constante com a superfície do molde, reduzindo o tempo de ciclo e melhorando a qualidade da peça final.

A integração de canais de refrigeração complexos diretamente nas cavidades do molde é uma vantagem importante (Figura 9).

Figura 9: Representação de um sistema de refrigeração conformal.



Fonte: Adaptado de MARQUES et al. (2015).

Autores relatam desafios relacionados ao pós-processamento de componentes impressos em 3D. Normalmente, são necessárias etapas adicionais de acabamento, como remoção de suportes, eliminação de empenamentos, rugosidades elevadas e necessidade de polimento para atingir as tolerâncias e acabamentos superficiais desejados. Isso pode aumentar o tempo e os custos de produção. Ressaltam também a importância do desenvolvimento de técnicas de pós-processamento eficientes para superar esse desafio (AHUJA, 2015; GADE, 2023; SADAF et al., 2024).

2.5.1 Parâmetros de impressão e pós-processamento

A seleção adequada dos parâmetros de impressão e a aplicação de técnicas de pós-processamento são fundamentais para garantir a qualidade dos moldes impressos em 3D. O controle preciso desses parâmetros e a utilização de técnicas de pós-processamento apropriadas contribuem para a obtenção de cavidades funcionais (ŠAFKA, 2016).

Parâmetros de impressão: A espessura da camada de deposição afeta a resolução e a precisão do molde impresso em 3D. Espessura de camada entre 0,1 e 0,05mm resultam em uma superfície mais suave e detalhes mais precisos das cavidades (SING et al., 2016). Resultando em uma menor rugosidade (ARASU et al., 2014).

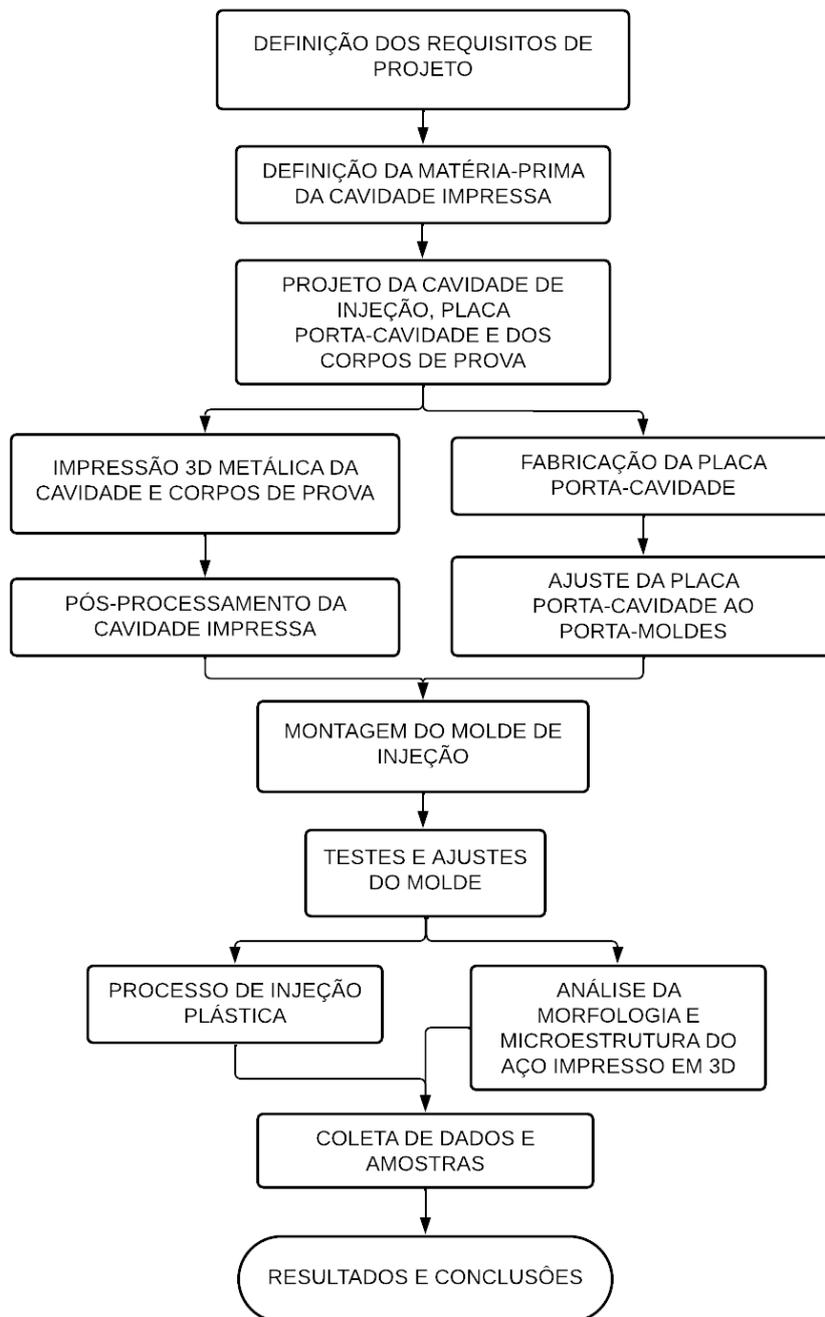
A densidade de preenchimento afeta a resistência e a estabilidade do molde impresso. Um aumento na densidade de preenchimento, como, por exemplo, preenchimento maciço, resulta em uma maior resistência mecânica da cavidade (NI et al., 2019).

Pós-processamento: Os suportes utilizados durante a impressão 3D devem ser removidos adequadamente para garantir a geometria precisa do molde. Técnicas de remoção de suporte, como corte ou jateamento de areia, são essenciais para obter uma superfície lisa e funcional da peça (SING et al., 2016). Bem como a remoção de imperfeições e rugosidades na superfície utilizando processos de retífica, polimento, lixamento ou jateamento para melhorar a qualidade superficial das cavidades impressos (ARASU et al., 2014).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, apresentaremos os materiais e métodos experimentais empregados no desenvolvimento desta dissertação. O fluxograma das atividades realizadas neste trabalho pode ser observado na Figura 10, fornecendo uma visão geral das etapas executadas.

Figura 10: Fluxograma das principais etapas da dissertação.



Fonte: Autor (2024).

O presente estudo foi realizado na cidade de Passo Fundo, localizada no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. O desenvolvimento das atividades práticas e teóricas foi conduzido nas instalações de uma empresa parceira, que disponibilizou as máquinas, equipamentos e recursos necessários para a fabricação, execução dos ferramentais e testes. A empresa também cedeu um porta-moldes padrão, matéria-prima para injeção, acesso ao processo de impressão 3D metálica e demais manufaturas correlacionadas ao desenvolvimento da pesquisa. Nos próximos tópicos, serão apresentados em detalhes os materiais utilizados durante a pesquisa.

3.1 Requisitos de projeto

Os requisitos a seguir foram definidos para a elaboração do molde protótipo com cavidade de injeção plástica, utilizando impressão 3D metálica por meio da tecnologia ADAM:

Impressão 3D Metálica: O projeto deve incluir a impressão 3D metálica apenas das cavidades do molde, utilizando a tecnologia ADAM. Essa abordagem visa otimizar o uso da manufatura aditiva, aplicando-a principalmente em geometrias complexas, enquanto componentes de geometria simples serão fabricados por métodos tradicionais.

Material Utilizado: O material escolhido para a fabricação do molde é o Aço H13. Este aço é reconhecido por suas propriedades mecânicas superiores e resistência ao desgaste, o que o torna adequado para aplicações em moldes de injeção.

Porta-Moldes Padrão: O molde de injeção deve contemplar a utilização de um porta-moldes padrão disponibilizado pela empresa parceira. Essa padronização facilitará a integração do molde com sistemas de injeção existentes, garantindo compatibilidade e eficiência operacional.

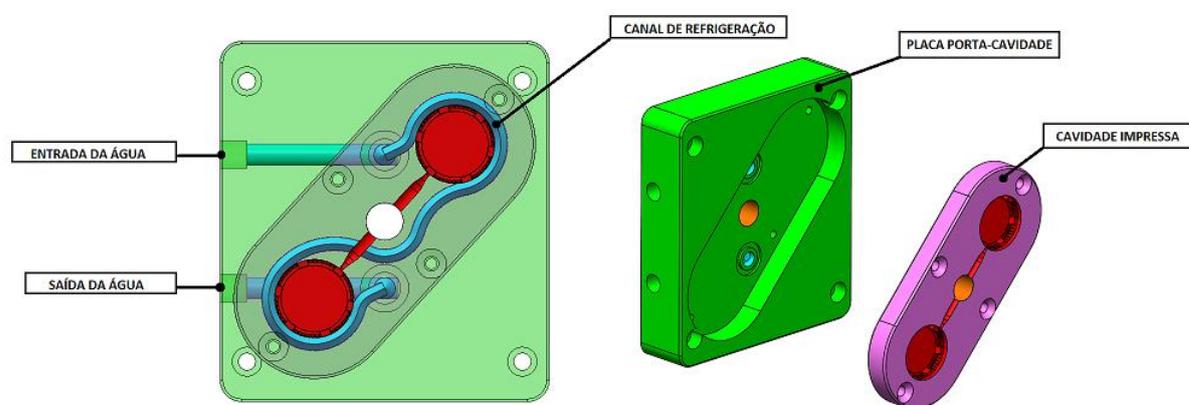
Sistema de Refrigeração Conformal: O projeto deve incorporar um sistema de refrigeração conformal, com canais de refrigeração otimizados e distribuídos uniformemente.

3.2 Modelagem 3D da cavidade de injeção

Para a modelagem dos ferramentais, foi utilizado o software *SolidWorks*. O modelamento em 3D da cavidade foi desenvolvido para contemplar um sistema de

refrigeração concêntrica à geometria da peça, no intuito de aumentar a eficiência de refrigeração do ciclo de injeção, o qual só é possível ser fabricado devido à utilização do processo de fabricação por impressão 3D. A fim de reduzir os custos fabricando somente a geometria necessária da cavidade impressa em 3D, foi projetada e fabricada uma placa porta-cavidades em aço 1045 usinada. Assim garantindo uma perfeita fixação ao porta-moldes. A representação da cavidade montada na placa porta-cavidades pode ser visualizada na Figura 11, evidenciando a disposição do sistema de refrigeração projetado para otimizar o resfriamento durante o processo de injeção.

Figura 11: Representação da cavidade de injeção com refrigeração integrada.



Fonte: Autor (2024).

3.3 Material de impressão

Para a produção da cavidade impressa em 3D, utilizou-se o aço H13 como material base. As propriedades mecânicas desse material podem ser observadas na Tabela 1, que apresenta dados relevantes, como resistência à tração, dureza e tenacidade, proporcionando informações sobre o desempenho e as características estruturais do aço H13 empregado na fabricação da cavidade. O *Datasheet* completo do aço H13 pode ser encontrado anexo no APÊNDICE A.

Tabela 1: Propriedades mecânicas aço H13 obtido por impressão 3D.

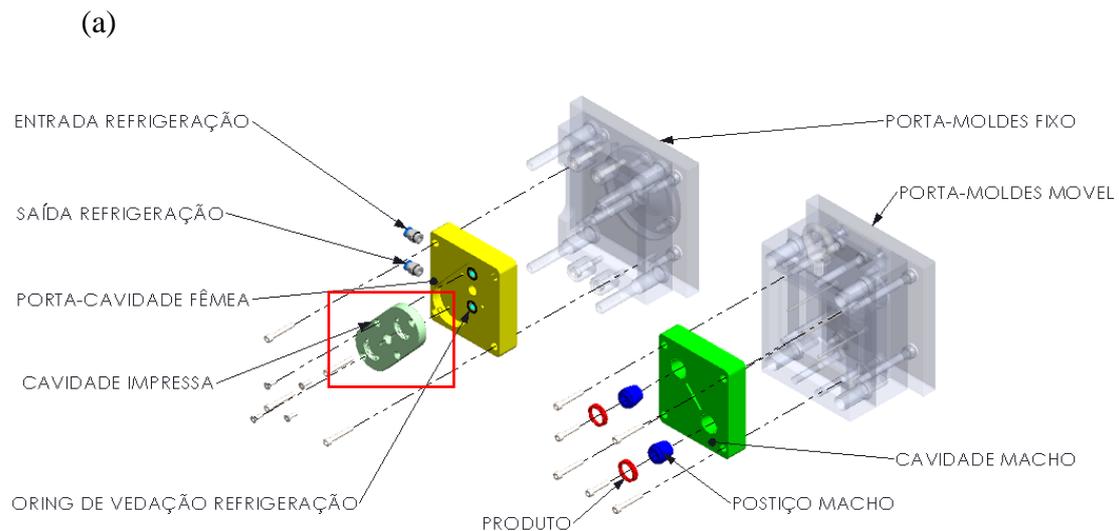
| Propriedade | Normas | Valores |
|------------------------|-----------|----------|
| Resistência a Tração | ASTM E8 | 1420 MPa |
| Alongamento na Ruptura | ASTM E8 | 5 % |
| Dureza | ASTM E18 | 40 HRC |
| Densidade Relativa | ASTM B923 | 94,5 % |

Fonte: (MARKFORGED, 2024).

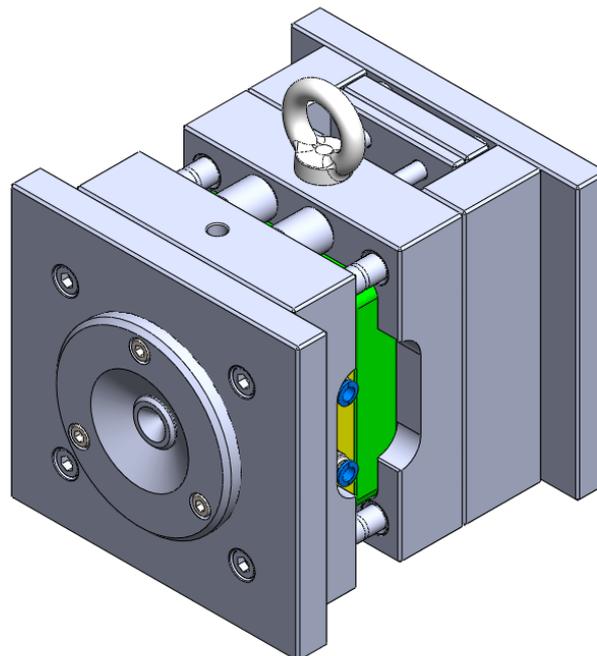
3.4 Projeto do molde

Para o projeto do molde, foi adotado o uso de um porta-moldes padrão, conforme ilustrado na Figura 12b. Servindo como base e ponto de partida para o projeto e fabricação das cavidades de injeção por meio de impressão 3D, juntamente com o uso de um porta-cavidades específico para garantir a correta acomodação e fixação das cavidades dentro do porta-moldes (Figura 12a).

Figura 12: Porta-moldes: a) vista explodida; b) vista montado.



(b)

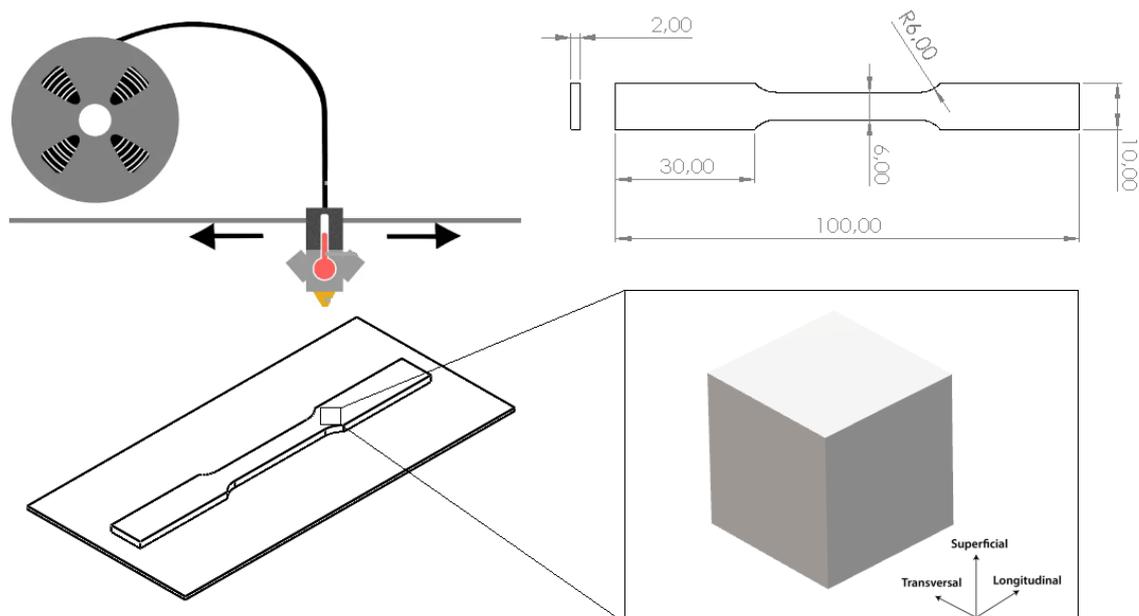


Fonte: Autor (2024).

3.5 Fabricação dos corpos de prova

Como já mencionado nos requisitos de projeto, o material escolhido foi o aço ferramenta H13 (FERIOTTI et al., 2021), fornecido pela empresa *MARKFORGED*, a mesma fabricante da impressora *METAL X*. A matéria-prima de impressão consiste em um ligante polimérico misturado com pó metálico, resultando em um filamento. Esse filamento é então extrudado e depositado camada por camada com calor para formar a peça desejada. Para remover a maioria do ligante, a peça é imersa em um solvente (modelo *Opteon SF-79*) por aproximadamente 12 horas a temperatura ambiente. Em seguida é sinterizada próximo ao seu ponto de fusão por aproximadamente 28 horas, eliminando qualquer resíduo do ligante e fundindo o pó (ARMSTRONG, 2022; BOUAZIZ et al., 2020; PELLEGRINI, 2024). Seis amostras foram produzidas utilizando o sistema *Metal X* da *Markforged* (GONG et al., 2021). As amostras foram fabricadas como peças sólidas, com camadas dispostas em orientação plana, alternando entre $\pm 45^\circ$, apresentando quatro contornos de parede e altura de camada pós-sinterizada de 125 μm (BOUAZIZ et al., 2020). A geometria dessas amostras segue as diretrizes da norma ASTM E8M e é detalhada na Figura 14.

Figura 13: Representação dos corpos de prova e orientação de impressão.



Fonte: Autor (2024).

3.5.1 Ensaios mecânicos

No âmbito dos ensaios mecânicos para avaliar os esforços de tração do aço H13 fabricado por Manufatura Aditiva (MA), foram realizados ensaios de dureza e de resistência à tração (DU et al., 2023; GONZALEZ-MORAN et al., 2023). Os ensaios de dureza foram conduzidos utilizando o Microdurômetro *Shimadzu*, modelo *HMV-G 20ST*, aplicando uma carga de 10 g em 6 pontos nas três regiões distintas do material: superficial, longitudinal e transversal, totalizando 18 pontos de micro dureza (BOUAZIZ et al., 2020; PELLEGRINI, 2024). Esta abordagem permitiu investigar as propriedades mecânicas do exterior ao núcleo, proporcionando uma compreensão mais abrangente do comportamento do aço H13 em diferentes áreas. Quanto à resistência à tração, os ensaios foram realizados conforme a norma ASTM E8M-00b, utilizando a Máquina *Shimadzu Servopulser* para aplicar força até a ruptura dos corpos de prova em aço H13 (HUANG, 2022; XU et al., 2024).

3.5.2 Análises microestruturais

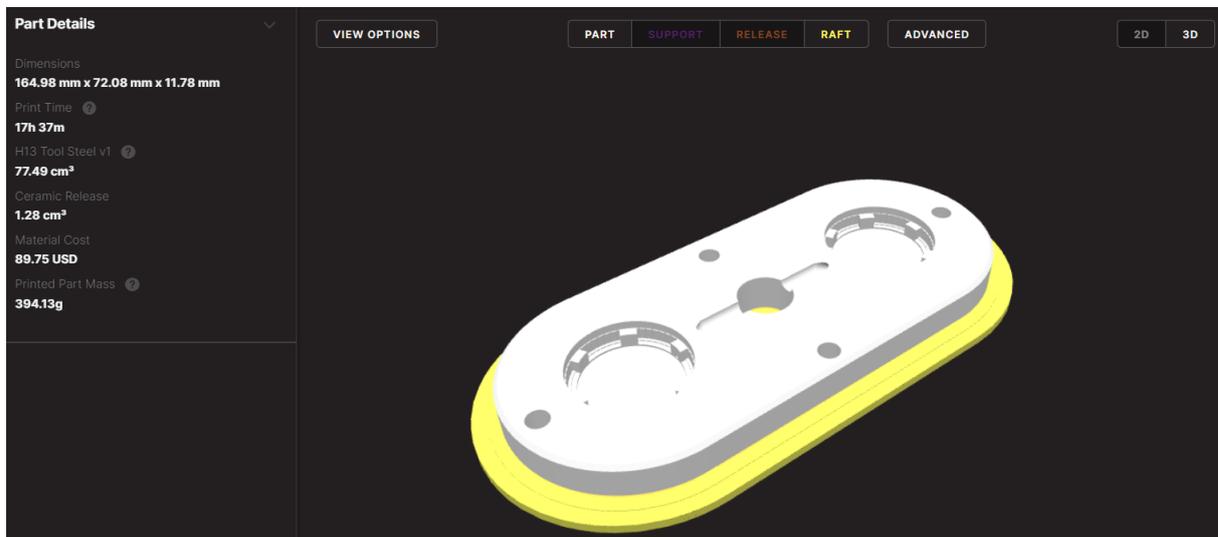
Dentro do campo das análises microestruturais para examinar a estrutura do material aço H13, foram empregadas diversas técnicas como microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de energia dispersiva (CHEMKHI et al., 2021; DU et al., 2023; XU et al., 2024). Para a análise microscópica, a amostra foi preparada e examinada no Microscópio *Zeiss Scope A1*. A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi conduzida com o equipamento *TESCAN* modelo *VEGA 3 LM*. A técnica de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), utilizando o Espectrômetro *Oxford Instruments Foundry-Master Xline*, foi utilizada em conjunto com a MEV para obter detalhes sobre a composição química dos elementos na superfície da amostra. No caso específico do aço H13, a sonda EDS *Oxford XMAX 20* foi empregada para analisar a composição química das inclusões presentes na estrutura do material.

3.6 Fabricação da cavidade impressa

Para a simulação, fatiamento e preparação para impressão da cavidade foi utilizado o software exclusivo da *Markforged*, o *Eiger IO*. Esse software é projetado especificamente para ser utilizado com os equipamentos da *Markforged*. A Figura 14

apresenta a representação visual da simulação de impressão realizada por meio desse software, demonstrando o processo de preparação da peça para a impressão 3D.

Figura 14: Preparação da peça para impressão 3D.

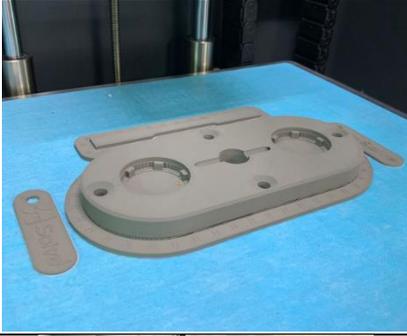


Fonte: Autor (2024).

É possível variar apenas 2 parâmetros de impressão neste equipamento, sendo eles a altura de camada Z e a densidade de preenchimento. A resolução da camada Z da impressora varia de 50 μm a 125 μm . Para garantir o melhor acabamento superficial foi escolhido a menor resolução, 50 μm . Quanto à geometria das peças internas, a impressora oferece duas opções: preenchimento de célula fechada (triangular) ou partes sólidas. Essas opções permitem a adaptação da estrutura interna das peças conforme as necessidades de resistência e peso. A densidade de preenchimento escolhida para este estudo foi de preenchimento 100%, para melhor se assemelhar a uma cavidade maciça fabricada pelos métodos tradicionais de usinagem.

Neste estudo, foram empregados 247,29 g de aço H13 para a fabricação da cavidade. O processo de impressão 3D dessa peça demandou um tempo total de 17 horas e 37 minutos. Em seguida, a cavidade passou por um processo de lavagem que durou aproximadamente 13 horas, seguido por 4 horas de secagem. Posteriormente, a peça foi submetida a um processo de sinterização com duração de 28 horas. As etapas de fabricação por impressão 3D ADAM e seus processos estão representadas na Tabela 2.

Tabela 2: Etapas de fabricação do processo ADAM.

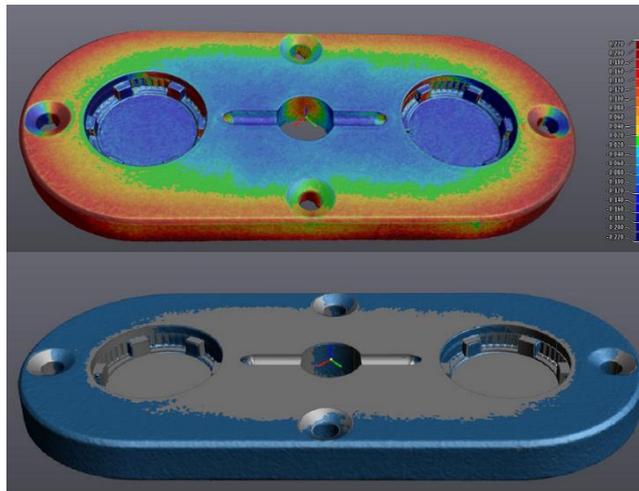
| | |
|--|--|
| <p>Impressão 3D da cavidade</p> <p>Tempo: 17h 37m Massa: 247,29g</p> |  |
| <p>Imersão em solvente e lavagem para remoção do aglutinante</p> <p>Tempo: 13h</p> |  |
| <p>Secagem para remoção da umidade</p> <p>Tempo: 4h</p> |  |
| <p>Sinterização para remoção do polímero e atomização do aço</p> <p>Tempo: 28h</p> |  |
| <p>Remoção da base de construção (RAFT)</p> <p>Tempo: 5min</p> |  |

Fonte: Autor (2024).

3.7 Escaneamento da cavidade impressa

Para realizar a conferência dimensional da cavidade após o processo de impressão 3D, utilizou-se um *scanner* 3D disponibilizado pela Universidade de Passo Fundo (UPF). A Figura 15 ilustra a sobreposição das malhas resultantes do processo.

Figura 15: Sobreposição das malhas escaneadas sob o projeto 3D da cavidade.



Fonte: Autor (2024).

Ao examinar o modelo escaneado por meio de uma sobreposição dos sólidos, constatou-se a presença de um excesso de material de aproximadamente 0,2mm. Segundo as informações fornecidas pelo fabricante da impressora, é necessário realizar ajustes dimensionais por meio de pós-processamento na cavidade impressa em 3D.

3.8 Pós-processamento da cavidade

O pós-processamento da cavidade impressa foi conduzido na matrizaria da empresa, que também foi responsável pela fabricação da placa porta-cavidade.

A fim de garantir a planicidade e remover o excesso de material evidenciado na sobreposição das malhas utilizando o *scanner* 3D, as faces da cavidade foram submetidas a um processo de retífica. Além disso, foi necessário realizar a usinagem do perímetro externo da cavidade para assegurar um ajuste preciso à placa porta-cavidade. Vale ressaltar que nenhum tipo de pós-processamento foi realizado na cavidade interna do produto, visando testar a viabilidade da impressão 3D para a criação de protótipos de baixo custo.

3.9 Injeção plástica

A realização do processo de injeção plástica contou com o uso de uma injetora de modelo EM-170 da marca Romi. O material de injeção escolhido foi o compósito de Poliamida 6.0 com 30% de Fibra de Vidro, escolhido com base no requisito técnico do produto a ser injetado definido pelo cliente. O Datasheet completo do material de injeção pode ser encontrado anexo no APÊNDICE B.

Por se tratar de uma cavidade impressa em 3D em aço H13, possuindo as mesmas características de um aço comumente utilizado para fabricação de cavidades convencionais, não há necessidade de realizar quaisquer variações de parâmetros de injeção em comparação com moldes convencionais, corroborando com as pesquisas de GOHN et al. (2022), JAHAN (2016) e LEÓN-CABEZAS (2017). No intuito de analisar a ciclagem contínua do processo de injeção, o teste de injeção será dividido em duas etapas, sendo a primeira responsável pelo *setup*, da Injetora e a segunda etapa o *tryout* de 100 ciclos de injeção. Por se tratar de um teste de aplicabilidade prática, os parâmetros do processo de injeção não foram variados e estudados nesta pesquisa e podem ser visualizados na Tabela 3.

Tabela 3: Principais parâmetros de injeção

| Propriedades | Unidade | Valores |
|------------------------------|----------------|-------------------------|
| Quantidade material separado | kg | 5 |
| Tempo de secagem | h | 6:00:00 |
| Temperatura de secagem | °C | 120 |
| Tempo de ciclo | s | 40 |
| Número de cavidades | Uni | 2 |
| Peso peça | g | 2 |
| Peso canal | g | 4 |
| Refrigeração | - | Sim |
| Tipo de injeção | - | Canal direto |
| Tipo de extração | - | Extração roscada manual |
| Pressão de fechamento molde | ton | 30 |
| Pressão de injeção | - | 40 |
| Temperatura de injeção | °C | 265 |

Fonte: Autor (2024).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados e discussões das etapas de desenvolvimento desta dissertação. Serão abordados os dados obtidos por meio da inspeção dimensional dos produtos injetados e da funcionalidade do molde de injeção, com o intuito de fornecer uma visão abrangente e aprofundada sobre o tema.

4.1 Morfologia e microestrutura do aço H13

4.1.1 Rugosidade e topografia da superfície

Com base na similaridade do processo de impressão ADAM com o FFF (GONG et al., 2021), a inspeção visual da superfície da amostra (Figura 16a) indicou sulcos formados pelo caminho do bico de impressão para depositar o material, causando assim rugosidade (BOUAZIZ et al., 2021). A análise de rugosidade Rz foi realizada como mostrado na Figura 16b. Essa análise revelou uma rugosidade Rz de $9,036\mu\text{m}$ e Ra de $8,574\mu\text{m}$, classificada como rugosidade grosseira para a maioria das aplicações do aço H13, corroborando com as afirmações de SUN (2019). Segundo CHEMKHI et al. (2021), uma rugosidade tão alta não é apropriada para uma variedade de aplicações de engenharia onde o contato superficial, o atrito e, especialmente, os fenômenos de fadiga são significativos.

Figura 16: Corpos de prova: representação da geometria superfície e coloração dos corpos de prova fabricados por ADAM.



Fonte: Autor (2024).

A Tabela 4 apresenta a composição química do aço H13 fabricado pela tecnologia ADAM, comparando os percentuais de cada elemento com os valores de um aço H13 normalizado comercialmente adquirido (“Aço H13 - AÇOESPECIAL”, 2024; MONTUORI et al., 2020; WEN et al., 2023; YANG et al., 2024).

Tabela 4: Composição química do aço H13 obtido por ADAM.

| | Elementos | C | Mn | P | S | Si | Cr | V | W | Mo |
|-----------|-----------|-----------|---------|--------|--------|----------|-------|----------|--------|---------|
| Impresso | (%) | 0,416 | 0,349 | 0,0123 | 0,0075 | 1,09 | 5,54 | 1 | 0,015 | 1,4 |
| Comercial | (%) | 0,32/0,47 | 0,2/0,5 | indef. | indef. | 0,85/1,2 | 5/5,5 | 0,85/1,2 | indef. | 1,2/1,7 |

Fonte: Autor (2024).

Os resultados indicam que o aço H13 impresso por ADAM possui teores de carbono (C), manganês (Mn), silício (Si), cromo (Cr), vanádio (V), tungstênio (W) e molibdênio (Mo) que estão dentro das expectativas para um material de alta performance. O percentual de carbono do aço impresso foi de 0,416%, o que se alinha à faixa especificada (0,32% a 0,47%) para a versão comercial, demonstrando uma boa adequação para aplicações que exigem resistência ao desgaste e dureza. Além disso, a presença de cromo (5,54%) e molibdênio (1,4%) no material impresso é particularmente relevante, uma vez que estes elementos são cruciais para a formação de uma matriz resistente e à melhoria das propriedades mecânicas do aço. Esses resultados corroboram a viabilidade do uso da manufatura aditiva com aço H13, não apenas em termos de composição química, mas também sugerem que o processo de impressão pode resultar em um material que mantém características desejáveis comparáveis aos aços H13 normatizados.

4.1.2 Propriedades de Dureza

Nesta seção, realizamos a análise dos resultados obtidos dos ensaios de microdureza *Vickers*, avaliando a dureza em diferentes direções (longitudinal, transversal e superficial) nas amostras testadas. Os dados coletados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Resultados dos Ensaios de Microdureza *Vickers*.

| Amostra | Longitudinal | Transversal | Superficial |
|-----------|--------------|-------------|-------------|
| Amostra 1 | 447 | 429 | 432 |
| Amostra 2 | 437 | 449 | 451 |
| Amostra 3 | 428 | 432 | 442 |
| Amostra 4 | 448 | 452 | 457 |
| Amostra 5 | 446 | 435 | 448 |
| Amostra 6 | 438 | 436 | 449 |

Fonte: Autor (2024).

A média e o desvio padrão dos resultados de microdureza foram calculados para cada direção, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6: Médias e Desvios Padrão das Direções Analisadas.

| Direção | Média | Desvio Padrão |
|--------------|--------|---------------|
| Longitudinal | 440,67 | 7,79 |
| Transversal | 438,83 | 9,41 |
| Superficial | 446,50 | 8,60 |

Fonte: Autor (2024).

A análise da variância entre as amostras foi realizada, e os resultados indicam a variação em cada direção, conforme segue:

Longitudinal: 60,67

Transversal: 88,57

Superficial: 73,90

As médias indicam que a microdureza superficial (446,50) é a mais alta, enquanto a longitudinal (440,67) e a transversal (438,83) apresentam valores próximos, sugerindo uma leve anisotropia nas propriedades do material. Essa diferença pode ser insignificante na aplicação do material em moldes de injeção.

Para validar os resultados obtidos, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) seguida do teste de *Tukey*. Os resultados da ANOVA mostraram um valor de F de 1,2929 com um p-valor ($PR(>F)$) de 0,3034, indicando que não há diferenças estatisticamente significativas entre as direções analisadas. Os resultados do teste de *Tukey* estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Resultados do Teste de *Tukey*.

| Comparação | Diferença das Médias | Limite Inferior | Limite Superior | p-valor Ajustado |
|--------------------------|----------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Longitudinal-Transversal | 1,8333 | -7,7080 | 11,3746 | 0,9640 |
| Longitudinal-Superficial | - 5,8333 | - 15,3746 | 3,7079 | 0,3195 |
| Transversal-Superficial | - 7,6667 | - 17,2079 | 1,8746 | 0,1440 |

Fonte: Autor (2024).

Os resultados do teste de *Tukey* revelaram que não existem diferenças significativas entre as médias de microdureza nas direções analisadas. Isso sugere que a microdureza é relativamente uniforme, o que é uma consideração importante para a aplicação do material em moldes de injeção, corroborando com as considerações de BOUAZIZ et al. (2020) e PELLEGRINI (2024).

4.1.3 Análise dos Ensaios de Tração e Comportamento de Fratura

Os ensaios de tração foram realizados com o objetivo de avaliar as propriedades mecânicas das amostras fabricadas e verificar seu comportamento de fratura. A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos para as amostras testadas, incluindo os valores de tensão máxima, alongamento e as dimensões da seção transversal antes e depois do ensaio.

Tabela 8: Resultados dos Ensaios de Tração.

| Amostra | L0 (mm) | L (mm) | E0 (mm) | E (mm) | B0 (mm) | B (mm) | Área (mm ²) | Força Tração (kN) | Tensão Máxima (MPa) | Alongamento (mm) | Alongamento (%) |
|---------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|-------------------------|-------------------|---------------------|------------------|-----------------|
| Cp 1 | 33,73 | 35,42 | 2,1 | 2,2 | 6,42 | 6,33 | 13,482 | 18,6566 | 1383,82 | 1,69 | 5,01 |
| Cp 2 | 33,88 | 35,52 | 2,11 | 2,1 | 6,41 | 6,38 | 13,5251 | 19,187 | 1418,62 | 1,64 | 4,84 |
| Cp 3 | 40,78 | 42,43 | 2,18 | 1,88 | 6,46 | 6,01 | 14,0828 | 18,657 | 1324,81 | 1,65 | 4,05 |

Fonte: Autor (2024).

As médias e desvios padrão dos valores de tensão máxima (MPa) e alongamento (%) foram calculados, conforme mostrado na Tabela 9.

Tabela 9: Médias e Desvios Padrão dos Ensaios de Tração.

| Parâmetro | Média | Desvio Padrão |
|---------------------|---------|---------------|
| Tensão Máxima (MPa) | 1375,75 | 47,70 |
| Alongamento (%) | 4,63 | 0,50 |

Fonte: Autor (2024).

A tensão máxima média foi de 1375,75 MPa, com um desvio padrão de 47,70 MPa, enquanto o alongamento médio foi de 4,63%, com um desvio padrão de 0,50%. Esses resultados indicam que o material testado apresenta alta resistência mecânica, mas com capacidade de alongamento moderada.

As variações observadas entre as amostras foram relativamente pequenas, especialmente no que diz respeito à tensão máxima. A amostra Cp2 apresentou o maior valor de tensão máxima, com 1418,62 MPa, enquanto a amostra Cp3 teve o menor valor, com 1324,81 MPa. Já o alongamento percentual variou de 5,01% na amostra Cp1 a 4,05% na amostra Cp3. Embora haja variação entre as amostras, as diferenças observadas permanecem dentro de uma faixa aceitável para materiais desse tipo.

Foi realizada uma análise estatística de variância (ANOVA) para verificar se as diferenças entre os valores de tensão máxima e alongamento são estatisticamente significativas. Os resultados indicam que as variações observadas entre as amostras não

são significativas para o nível de confiança adotado ($p > 0,05$). O teste de *Tukey*, detalhado na Tabela 10, também não identificou diferenças significativas.

Tabela 10: Resultados do Teste de *Tukey* da Tensão e Deformação.

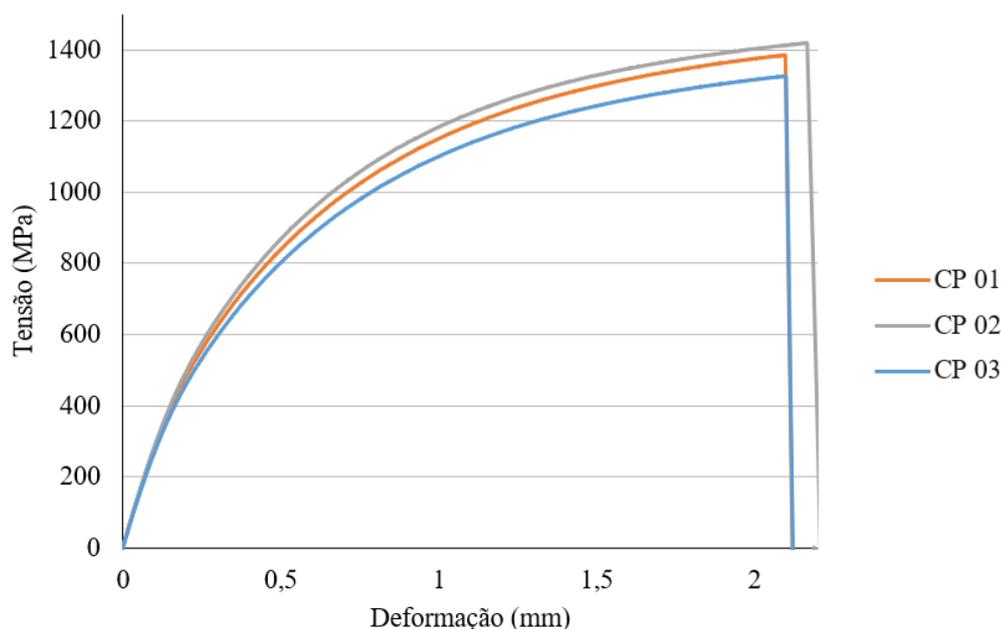
| Comparação | Diferença das Médias | Limite Inferior | Limite Superior | p-valor Ajustado |
|---------------------------|----------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Tensão Máxima-Alongamento | 1371,12 | 1314,20 | 1428,04 | 0,95 |

Fonte: Autor (2024).

Com base nesses resultados, pode-se concluir que não há diferenças estatísticas significativas entre as amostras quanto à tensão máxima ou alongamento, indicando que o material apresenta um comportamento homogêneo.

O comportamento de fratura das amostras também pode ser avaliado a partir dos resultados de tração. O alongamento máximo das amostras foi relativamente baixo, variando entre 4,05% e 5,01%, o que indica que o material possui um comportamento semi-dúctil. Esse tipo de comportamento é caracterizado por uma ligeira deformação plástica antes da ruptura, mas sem apresentar grande alongação. Na Figura 17 está representado o comportamento das curvas de Tensão em relação a Deformação das amostras.

Figura 17: Comportamento da Tensão e Deformação de 3 corpos de prova fabricados em aço H13 por ADAM.



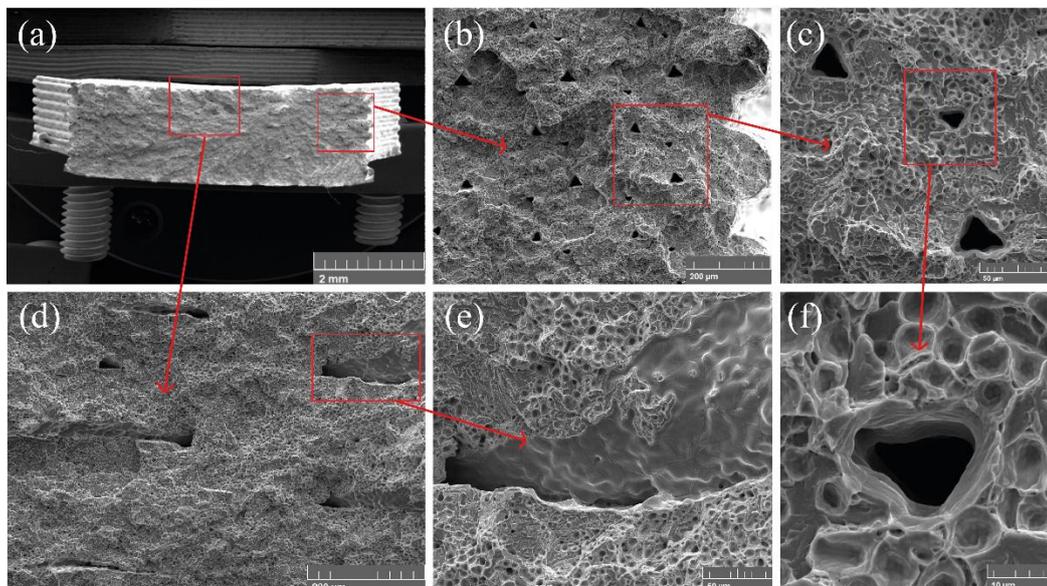
Fonte: Autor (2024).

A redução de área também foi observada nas amostras, com uma diminuição da largura (B) após o ensaio, principalmente na amostra Cp3, que passou de 6,46 mm para 6,01 mm. Essa redução de área, juntamente com a variação nos valores de alongamento, indica que o material apresenta características de fratura semi-dúctil a frágil.

Os dados sugerem que o material tem uma alta resistência mecânica, mas com capacidade limitada de deformação antes da fratura, o que é esperado para materiais como o aço H13, utilizado em aplicações de alta resistência, como moldes de injeção, concordando com os resultados de SPILLER (2022).

A Figura 18a revela que toda a morfologia da fratura é uniformemente plana e homogênea (LI et al., 2023). Numerosos microporos, que se assemelham a *dimples*, estão uniformemente dispersos pela superfície da fratura, conforme demonstrado nas Figuras 18b e 18c. Dado que os defeitos (vazios) originados pelo processo de impressão são mais destacados do que os poros de sinterização, sugere-se que não há defeitos de impressão na fratura, corroborando com ARMSTRONG (2022), SINGH et al. (2021) e YANG et al. (2024), exceto por algumas trincas com aproximadamente 200 μm de comprimento na zona D (Figura 18d). A Figura 18d apresenta uma ampliação das trincas, cujas características morfológicas circundantes são semelhantes às da Figura 18c. A ampliação dos microporos (Figura 18f) revela que estão cercados por clivagem, características típicas de fratura frágil. Isso sugere que a fratura pode ser caracterizada como dúctil-frágil, também constatado por LEI et al. (2022), LI et al. (2023) e WEN et al. (2023). Ao contrário dos poros, o interior da trinca exibe uma morfologia lisa (Figura 18e), sugerindo que a trinca não se desenvolveu durante o teste de tração, mas sim como um possível defeito de adesão das camadas ou até mesmo um vazio transversal entre as camadas de impressão introduzidas pelo processo ADAM (ARMSTRONG, 2022; GONZALEZ-GUTIERREZ et al., 2018; LI et al., 2023; SINGH et al., 2021).

Figura 18: Mapa geral da análise da fratura de um corpo de prova de aço H13 obtido por ADAM: (a) visão geral da fratura mostrando a morfologia, (b) visão ampliada da zona b em (a), (c) vista ampliada da zona c em (b) mostrando a existência e característica de microporos e vazios representativos introduzidos pela sinterização, (d) vista ampliada da zona d em (a), (e) vista ampliada da zona e em (d) mostrando a trinca introduzida pela impressão, (f) vista ampliada da zona f em (c).



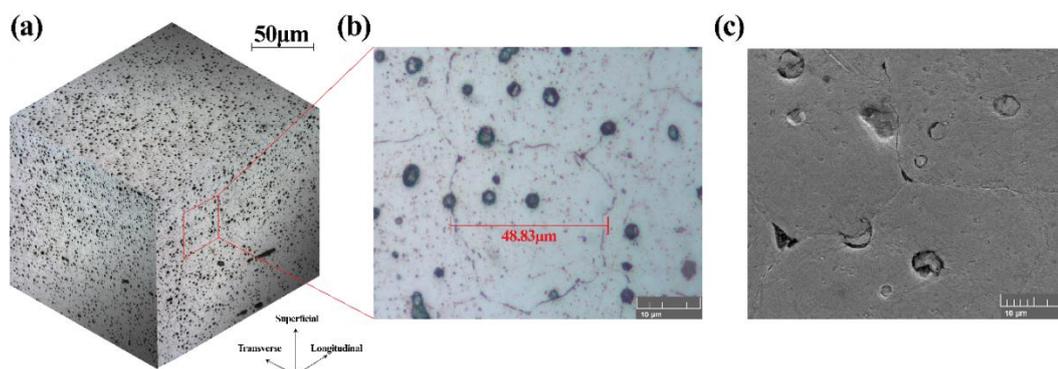
Fonte: Autor (2024).

4.1.4 Caracterização Microestrutural

A microscopia óptica em 3D (Figura 19a) da microestrutura do aço mostra claramente a distribuição dos grãos e partículas presentes no material. A técnica destaca a distribuição de carbonetos dentro da matriz de ferrita ou martensita. As regiões escuras provavelmente são os carbonetos, enquanto as claras podem representar a matriz metálica (como martensita ou ferrita). (LEI et al., 2022; XU et al., 2024; YANG et al., 2024). Ampliando a zona b (Figura 19b) o tamanho de grão é evidenciado, com uma escala de 50 µm indicada na imagem. A amostra mostra contornos de grãos bem definidos, e podemos ver uma distribuição de partículas escuras (provavelmente carbonetos) dentro de uma matriz mais clara. O tamanho de grão medido é de aproximadamente 48,83 µm, sugerindo uma estrutura de grãos relativamente fina, o que pode melhorar a resistência ao desgaste e ao choque térmico. (LAURO et al., 2014). O mapeamento MEV foi realizado na Figura 19c com foco nas junções triplas entre contornos de grãos. As junções

tripas são regiões onde três contornos de grão se encontram, e o comportamento mecânico dessas áreas pode ser crítico para a resistência do material. Aqui, observam-se algumas cavidades ou porosidades, o que pode indicar defeitos internos, como inclusões ou falhas na solidificação. (ARMSTRONG, 2022; GONG et al., 2021).

Figura 19: (a) microestrutura óptica representada em 3D, (b) microscopia óptica ampliada (zona b) evidenciando o tamanho de grãos da amostra, (c) mapa da distribuição elementar de junções triplas de contornos de grão de ferrita.

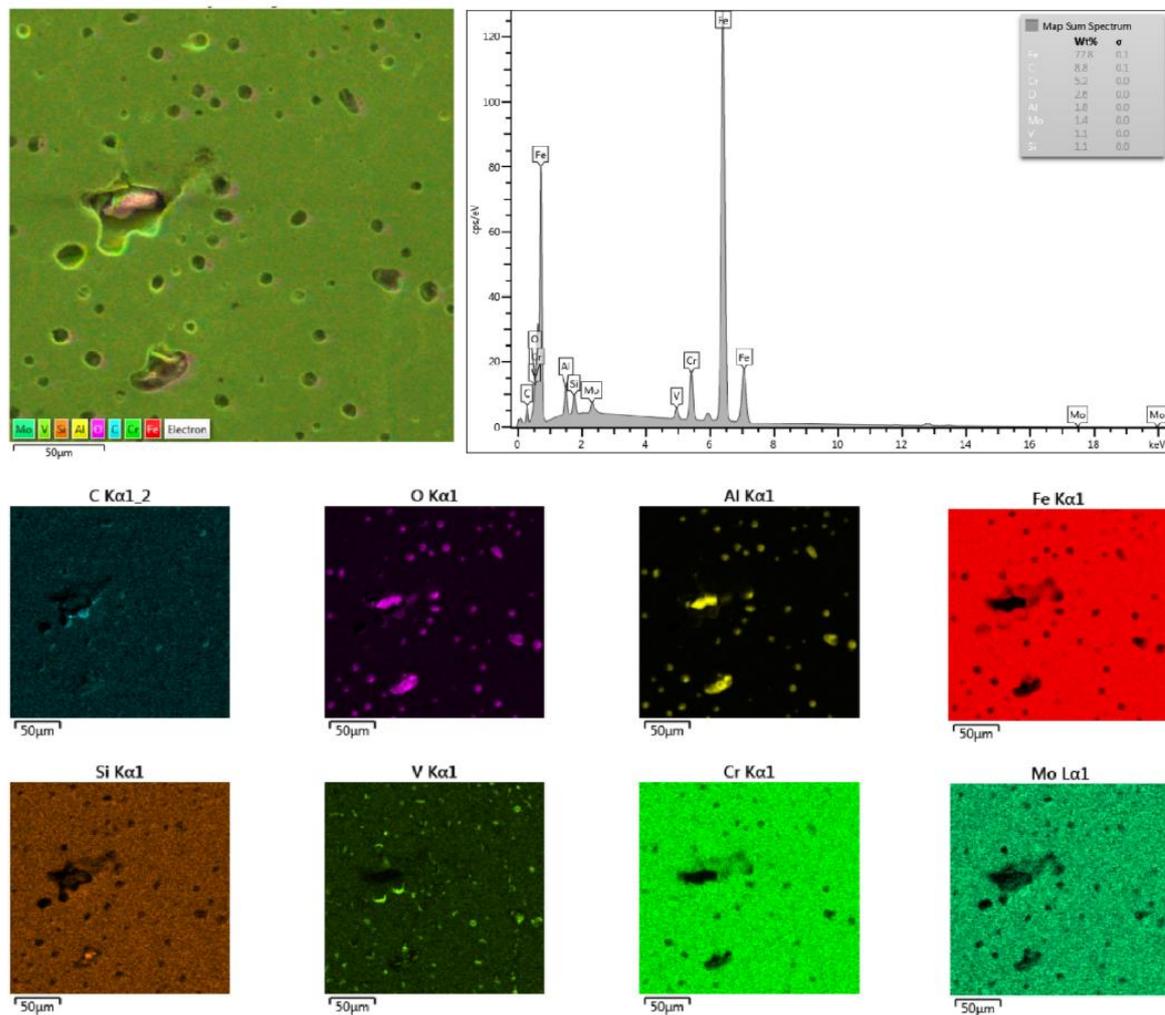


Fonte: Autor (2024).

A microestrutura do aço H13 sinterizado revela a predominância de martensita, visível nas regiões mais claras, responsável por conferir alta dureza e resistência ao desgaste. As partículas escuras observadas nas imagens representam carbonetos de elementos como cromo, vanádio e molibdênio, que aumentam a durabilidade do material. Além disso, pequenas quantidades de ferrita estão presentes nas junções triplas dos contornos de grão, como mostrado na imagem (c), contribuindo para a ductilidade. Essa distribuição de fases torna o H13 adequado para moldes de injeção plástica, proporcionando resistência térmica e mecânica aprimoradas.

Na Figura 20 podemos observar a análise EDS das amostras de aço H13 impresso por ADAM. Sugere-se uma distribuição homogênea consistente com a distribuição espacial dos elementos na microestrutura normalizada consistente com o trabalho de LEI et al. (2022) e SINGH et al. (2021). Na análise das inclusões é possível observar a presença de oxigênio retido, caracterizando-as como regiões de vazio com diâmetro médio de aproximadamente 10 μm , confirmando as análises da micrografia e as afirmações de BERNARD et al. (2023), BOUAZIZ et al. (2020) e LI et al. (2023).

Figura 20: Mapa geral de EDS apresentando a distribuição dos elementos constituintes da composição do aço H13.



Fonte: Autor (2024).

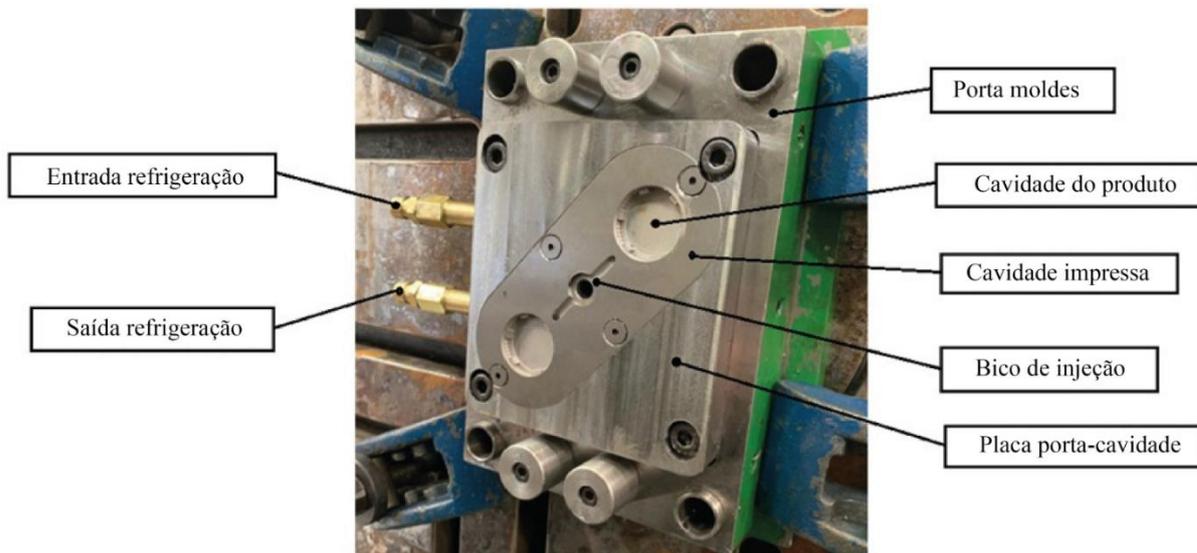
4.2 Montagem do molde

Para poder adaptar a cavidade impressa em 3D ao molde porta-moldes padrão, foi necessário a fabricação de alguns componentes, tais como placa e pinos de extração e calços. Devido ao fato do produto escolhido para ser injetado possuir uma rosca interna, foi necessário a fabricação de posições de rosca usinado para completar a forma do produto em conjunto com a cavidade impressa.

A cavidade impressa em 3D foi cuidadosamente montada e ajustada dentro da cavidade de injeção. Em seguida, essa montagem foi conectada ao porta-molde e ajustada para garantir um fechamento preciso. A Figura 21 ilustra a cavidade já montada, pronta

para o próximo estágio do processo. Durante essa etapa de montagem, foram realizados testes para verificar a eficiência do sistema de refrigeração e também para garantir a padronização dos conectores de engate rápido.

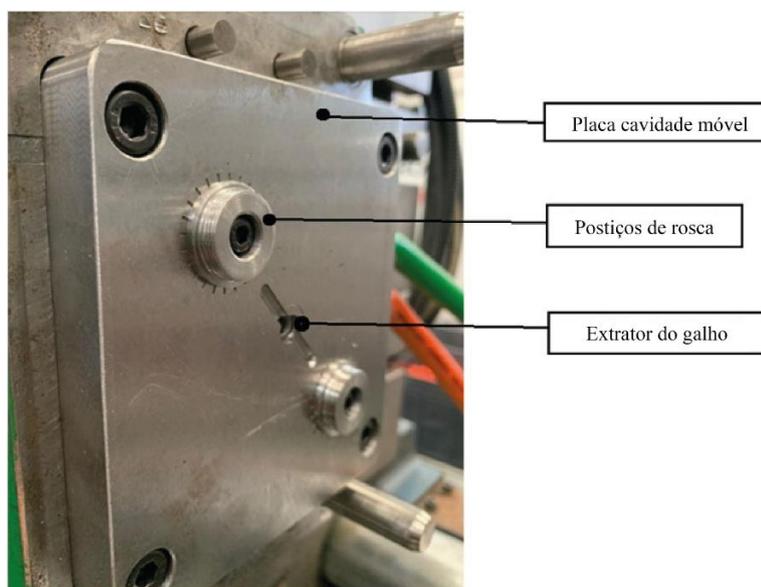
Figura 21: Cavidade impressa em 3D montada ao porta-moldes.



Fonte: Autor (2024).

A placa porta cavidades de extração também foi montada no porta-moldes juntamente com os postigos de rosca e placa de extração. Como podemos ver na Figura 22.

Figura 22: Cavidade de extração montada ao morta-molde.



Fonte: Autor (2024).

4.3 Teste de refrigeração da cavidade

Realizando testes de estanqueidade na cavidade antes de iniciar o processo de injeção, foi constatado que os canais de refrigeração conformais obtiveram êxito, não apresentando vazamentos prematuros de água. No entanto, a pressão de fechamento aplicada para a calibração da injetora ocasionou uma fissura na cavidade interna do produto, causando um leve gotejamento de água provenientes do canal de refrigeração.

Sendo assim, o restante dos testes foi realizado sem a utilização de refrigeração na cavidade.

4.4 Teste de injeção plástica

Após o preparo da injetora constatou-se que uma injetora de menor capacidade seria mais adequada para os testes realizados, considerando que os parâmetros utilizados foram praticamente os mínimos da máquina. No entanto, foi possível estabilizar o processo, extraindo assim as primeiras amostras de peça (Figura 23a). Tendo em vista que o molde é de caráter protótipo, a extração das peças foi feita forma manual, sendo o postigo removido e o produto desrosqueado manualmente (Figura 23b).

Figura 23: Amostra dos produtos injetados.



Fonte: Autor (2024).

4.5 Desempenho da cavidade impressa

Durante o *tryout* (primeiro teste de injeção do após ajustes da máquina), foram realizados aproximadamente 100 ciclos contínuos de injeção. Os ciclos completos de injeção foram cronometrados em 70s, divididos em 40s para o processo de injeção e 30s para a remoção das peças injetadas, tendo em vista que a extração do produto era rotativa manual. A Figura 24a ilustra a aparência da cavidade após a conclusão da injeção, apresentando uma marca de esmagamento na face de fechamento entre a cavidade e o postigo.

Na análise das deformações do molde após os 100 ciclos de injeção plástica, foram realizadas sobreposições dos escaneamentos 3D da cavidade impressa em dois momentos distintos: antes e depois do processo de injeção. O objetivo foi verificar a ocorrência de deformações que pudessem comprometer a integridade dimensional e funcional do molde.

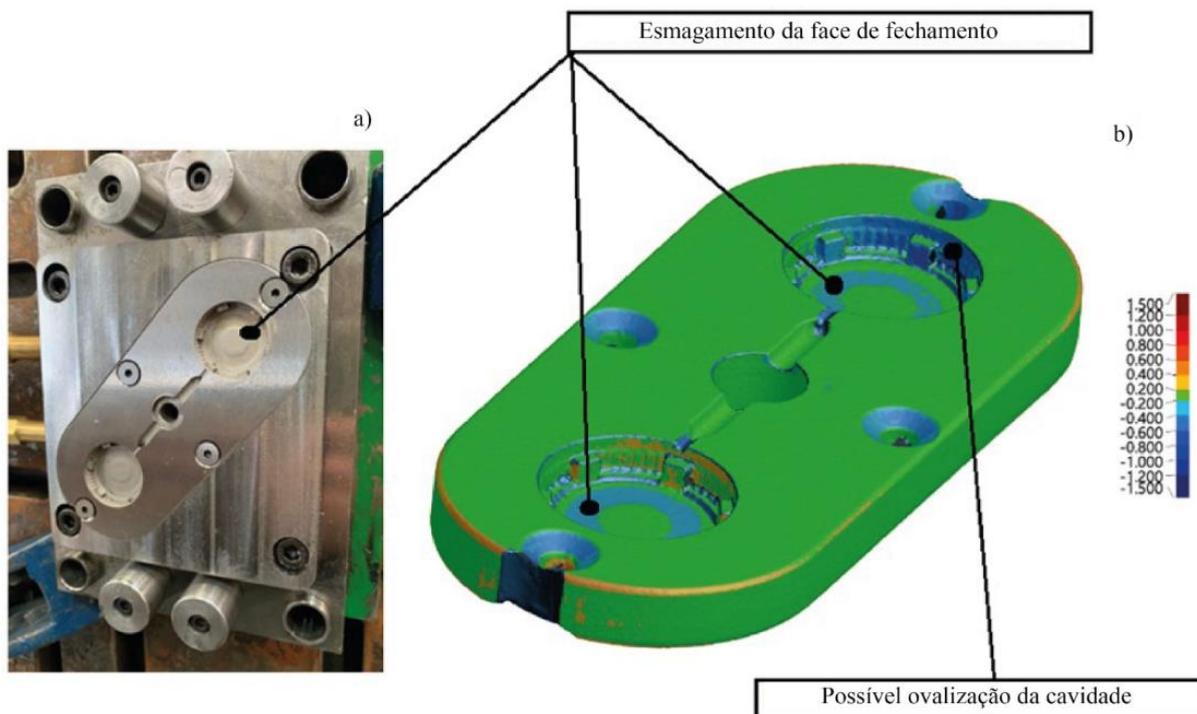
Inicialmente, a análise indicada pela Figura 24b sugeriu uma possível ovalização da cavidade. No entanto, uma investigação mais aprofundada não revelou qualquer indício de ovalização significativa nas peças injetadas. Adicionalmente, ao realizar uma inspeção visual detalhada na cavidade do molde, conforme mostrado na Figura 24a, não foram identificadas ovalizações notáveis. Isso sugere que a distorção visualizada no escaneamento pode ter sido causada por uma falha de posicionamento ou uma distorção devido à resolução do equipamento utilizado, ao invés de representar uma deformação real da cavidade.

Outro ponto relevante da análise foi o esmagamento da face de fechamento, também observado na Figura 24b, evidenciando uma deformação em uma área específica do molde. No entanto, essa deformação não apresentou impacto significativo nos testes realizados, uma vez que se localiza em uma região de fechamento, que não afeta diretamente o dimensional das peças injetadas. Assim, o esmagamento observado não interferiu na qualidade dos produtos, confirmando que essa área pode ser tolerada dentro dos limites do processo.

Com base nesses resultados, conclui-se que o molde de injeção manteve-se funcional após os 100 ciclos, sem apresentar deformações relevantes que comprometessem a qualidade das peças. O comportamento adequado da cavidade e a

localização estratégica do esmagamento reforçam a viabilidade do uso da impressão 3D metálica em aço H13 para a fabricação de moldes de injeção plástica.

Figura 24: a) Ilustração da cavidade após primeiro *tryout*. b) escaneamento 3D da cavidade após 100 ciclos.



Fonte: Autor (2024).

4.6 Avaliação do produto injetado

Os produtos resultantes do *tryout* passaram por uma inspeção na qual foram avaliados os aspectos dimensionais, levando em consideração as tolerâncias requeridas, bem como o aspecto físico do produto, verificando possíveis empenamentos, rebarbas ou deformações indesejadas. No intuito de analisar a resistência da cavidade de injeção em um regime de ciclagem contínua, foram escolhidos dois parâmetros para serem avaliados. O primeiro deles foi o dimensional do diâmetro externo do produto, no intuito de avaliar o impacto da ovalização da cavidade impressa, e o outro foi o aspecto visual, tendo em vista que o produto possui detalhes finos menores que 1mm no estilo de ranhuras em sua geometria.

Neste estudo, avaliamos as variações dimensionais de 100 amostras da peça fabricadas por injeção plástica. O objetivo foi verificar a conformidade das peças com a tolerância dimensional especificada de 0,1 mm e identificar se há variações significativas

entre as medidas obtidas. As análises incluíram o cálculo da média, desvio padrão, teste de normalidade (Shapiro-Wilk) e um teste t de uma amostra para verificar a diferença em relação a um valor de referência (29 mm).

A Tabela 11 a seguir apresenta as medidas obtidas para cada uma das 100 peças injetadas em milímetros:

Tabela 11: Medidas do diâmetro externo das amostras injetadas.

| Amostra | Medida (mm) |
|---------|-------------|
| 1 | 29,01 |
| 2 | 28,97 |
| 3 | 29,03 |
| 4 | 29,08 |
| 5 | 29,01 |
| 6 | 28,98 |
| 7 | 29,05 |
| 8 | 29,07 |
| 9 | 28,99 |
| 10 | 29,02 |
| ... | ... |
| 99 | 29,03 |
| 100 | 29,02 |

Fonte: Autor (2024).

A média e o desvio padrão das medidas das peças injetadas foram calculados como segue:

Média: 29,028 mm

Desvio Padrão: 0,034 mm

A variação das medidas ao redor da média (29,03 mm) é relativamente pequena, com um desvio padrão de 0,034 mm, o que está bem dentro da tolerância dimensional especificada de $\pm 0,1$ mm. Essa variação indica que o processo de injeção plástica é consistente, e as peças estão sendo fabricadas dentro das especificações.

Considerando a tolerância dimensional de 0,1 mm, as peças devem ter medidas compreendidas entre 28,90 mm e 29,10 mm para serem consideradas dentro das especificações. Dado que a média das medidas (29,03 mm) está muito próxima do valor nominal de 29 mm, e o desvio padrão é relativamente baixo (0,034 mm), podemos concluir que todas as medidas individuais estão dentro do intervalo de tolerância especificado.

O teste de *Shapiro-Wilk* foi aplicado para verificar se as medidas seguem uma distribuição normal (Tabela 12):

Tabela 12: Análise estatística *Shapiro-Wilk*.

| Teste de Shapiro-Wilk | Estatística | Valor p |
|-----------------------|-------------|---------|
| Shapiro | 0,944 | 0,00032 |

Fonte: Autor (2024).

Com um valor $p < 0,05$, rejeitamos a hipótese nula de que os dados seguem uma distribuição normal. Isso indica que as variações nas medidas não se distribuem normalmente, o que pode ser relevante para a escolha de métodos estatísticos futuros, como o controle de qualidade baseado em distribuições não normais.

Para avaliar se a média das medidas é significativamente diferente de 29 mm, realizamos o teste t de uma amostra (Tabela 13):

Tabela 13: Análise estatística Teste t.

| Teste t | Estatística t | Valor p |
|---------|---------------|----------|
| t-test | 8,31 | 5,17e-13 |

Fonte: Autor (2024).

O valor p extremamente pequeno ($p < 0,05$) nos permite concluir que a média das medidas é significativamente diferente de 29 mm. No entanto, essa diferença é muito pequena em termos práticos (apenas 0,03 mm) e permanece bem dentro da tolerância dimensional de 0,1 mm. Assim, essa diferença não compromete a qualidade das peças injetadas.

Os resultados da análise estatística indicam que as peças fabricadas por injeção plástica estão dentro da tolerância dimensional especificada de $\pm 0,1$ mm. A variação nas medidas é pequena e o desvio padrão é baixo, indicando um processo de fabricação consistente e controlado. Embora o teste t tenha mostrado uma diferença significativa entre a média observada (29,03 mm) e o valor nominal de 29 mm, essa diferença é irrelevante para a conformidade com as especificações de qualidade.

No entanto, o teste de *Shapiro-Wilk* revelou que os dados não seguem uma distribuição normal, o que sugere a necessidade de considerar abordagens alternativas para o controle estatístico de qualidade, como métodos que lidam com distribuições não normais. Em resumo, o processo de fabricação está operando dentro dos parâmetros esperados, e as peças produzidas estão adequadas ao uso final.

4.7 Comparativo de custos x tempo

A cavidade impressa em 3D de aço H13 teve um custo de fabricação de aproximadamente US\$ 559,50, considerando a impressão e todos os pós-processamentos. O tempo total de fabricação foi de 54 horas, ou menos de 3 dias, devido ao centro de manufatura aditiva funcionar 24 horas por dia.

Por outro lado, a fabricação da mesma cavidade usando métodos convencionais de manufatura subtrativa teria um custo aproximado de US\$ 413,15. Embora o custo seja cerca de 26% menor em comparação com a impressão 3D, o tempo de fabricação é significativamente maior. O processo convencional levaria aproximadamente 50 horas, resultando em 6 dias de trabalho, dado o regime de funcionamento de 8 horas e 48 minutos por dia. Isso representa uma redução de 50% no tempo total de fabricação com a manufatura aditiva.

A principal vantagem da manufatura aditiva, neste caso, é a significativa redução de tempo de produção, que é cortada pela metade em comparação com os métodos convencionais. Embora o custo da impressão 3D seja aproximadamente 35% maior do que o processo subtrativo tradicional, a agilidade no tempo de entrega pode ter um impacto direto na eficiência operacional de uma empresa, especialmente em cenários onde o tempo de mercado é crítico.

O principal impacto identificado neste comparativo é a capacidade da impressão 3D de acelerar o ciclo de produção, possibilitando maior flexibilidade e rapidez no desenvolvimento de protótipos e produtos. A redução de tempo também pode compensar o custo mais elevado em situações onde o fator "*time to market*" é crucial para a competitividade.

5 CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo avaliar a viabilidade de utilização da impressão 3D metálica na fabricação de cavidades de moldes protótipos para injeção plástica, utilizando aço H13 e o processo ADAM. A pesquisa contemplou uma análise abrangente das características do aço impresso, da performance do molde em testes de injeção, e do comparativo de custos entre a manufatura aditiva e os métodos convencionais de usinagem.

A partir dos resultados obtidos, destacam-se as seguintes descobertas principais:

- **Caracterização do Aço H13 por ADAM:** O aço H13 fabricado por meio da tecnologia ADAM apresentou uma composição química consistente com a versão comercial. Os ensaios mecânicos indicaram que o aço H13 impresso é adequado para aplicações em moldes de injeção, apresentando propriedades comparáveis ao material convencional.
- **Propriedades Mecânicas e Estruturais:** As análises de microdureza revelaram uma homogeneidade relativa entre as direções longitudinal, transversal e superficial, sem diferenças estatisticamente significativas. No ensaio de tração, as amostras mostraram elevada resistência mecânica, embora com capacidade de alongamento moderada, indicando um comportamento semi-dúctil e adequado para suportar esforços típicos de operações de injeção plástica.
- **Desempenho e Viabilidade do Molde Impresso:** Os testes de injeção demonstraram que o molde impresso em 3D foi funcional e compatível com os requisitos industriais de operação, resultando em produtos finais com dimensões precisas e acabamento superficial aceitável. O sistema de refrigeração conformal integrado ao molde contribuiu para uma boa manutenção da temperatura do processo, sem comprometer a integridade do molde ao longo dos ciclos de injeção.
- **Comparativo de Custo e Tempo:** A comparação entre a fabricação por impressão 3D e métodos convencionais de usinagem apontou que, embora o custo inicial de produção seja maior na manufatura aditiva, o tempo de execução reduzido para peças complexas pode justificar o investimento, especialmente em cenários de produção de protótipos onde a agilidade é um fator crítico.

Este trabalho contribui para o avanço da aplicação prática da manufatura aditiva em processos industriais, demonstrando que a impressão 3D metálica com aço H13 pode ser uma alternativa viável para a produção de moldes protótipos de injeção plástica. A pesquisa sugere que, com aprimoramentos nos processos de pós-processamento e na adequação de custos, essa tecnologia pode se tornar uma alternativa competitiva aos métodos convencionais em aplicações industriais.

Para futuros estudos, recomenda-se investigar a aplicação da impressão 3D com outros materiais metálicos e explorar melhorias nas técnicas de pós-processamento para otimizar as propriedades de superfície e resistência do molde. Além disso, a avaliação de diferentes parâmetros de injeção e variações de ciclos poderia aprofundar a compreensão do desempenho e da durabilidade dos moldes produzidos por manufatura aditiva.

6 REFERÊNCIAS

Aço H13 - AÇOESPECIAL. Disponível em: <<https://www.acoespecial.com.br/aco-h13.php>>. Acesso em: 25 ago. 2024.

Additive Manufacturing Global Market Report 2024. Disponível em: <<https://www.researchandmarkets.com/reports/5807051/additive-manufacturing-global-market-report>>. Acesso em: 2 out. 2024.

Additive Manufacturing Market: Global Analysis and Forecast. Disponível em: <<https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/additive-manufacturing-market/146140/>>. Acesso em: 2 out. 2024.

Additive Manufacturing Market Size Report, 2030. Disponível em: <<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/additive-manufacturing-market>>. Acesso em: 2 out. 2024.

ADEKANYE, S. A. et al. Additive manufacturing: The future of manufacturing: Dodajalna (3D) Tehnologija: Prihodnost Proizvajanja. **Materiali in Tehnologije**, v. 51, n. 5, p. 709–715, 2017.

AHMED, A. A. et al. Comparative sustainability assessment of powder bed fusion and solid-state additive manufacturing processes: The case of direct metal laser sintering versus additive friction stir deposition. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 39, p. e00858, 1 abr. 2024.

AHUJA, B.; KARG, M.; SCHMIDT, M. Additive manufacturing in production: challenges and opportunities. **Laser 3D Manufacturing II**, v. 9353, p. 935304, 16 mar. 2015.

AL RASHID, A.; KOÇ, M. Additive manufacturing for sustainability and circular economy: needs, challenges, and opportunities for 3D printing of recycled polymeric waste. **Materials Today Sustainability**, v. 24, p. 100529, 1 dez. 2023.

ALFAIFY, A. et al. **Design for additive manufacturing: A systematic review.** **Sustainability (Switzerland)**MDPI, , 1 out. 2020.

ARASU, I. V. et al. Optimization of surface roughness in selective laser sintered stainless steel parts. **International Journal of ChemTech Research CODEN (USA)**, v. 6, n. 5, p. 2993–2999, 2014.

ARMSTRONG, M.; MEHRABI, H.; NAVEED, N. An overview of modern metal additive manufacturing technology. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 84, p. 1001–1029, 1 dez. 2022.

ÅSBERG, M. et al. Influence of post treatment on microstructure, porosity and mechanical properties of additive manufactured H13 tool steel. **Materials Science and Engineering: A**, v. 742, p. 584–589, 10 jan. 2019.

ATHALE, M. et al. Design, performance, and cost savings of using GF-PC additively manufactured tooling for stamping of HSS 590 sheet metal. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 101, p. 1–14, 8 set. 2023.

BARBOSA, R. C. N.; CAMPILHO, R. D. S. G.; SILVA, F. J. G. Injection mold design for a plastic component with blowing agent. **Procedia Manufacturing**, v. 17, p. 774–782, 2018.

BARRIONUEVO, G. O. et al. Influence of the Processing Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of 316L Stainless Steel Fabricated by Laser Powder Bed Fusion. **Journal of Manufacturing and Materials Processing 2024, Vol. 8, Page 35**, v. 8, n. 1, p. 35, 9 fev. 2024.

BERNARD, A. et al. Vision on metal additive manufacturing: Developments, challenges and future trends. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 47, p. 18–58, 1 dez. 2023.

BOUAZIZ, M. A. et al. Microscale mechanical characterization of 17-4PH stainless steel fabricated by Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM). **Procedia Structural Integrity**, v. 28, p. 1039–1046, 1 jan. 2020.

BOUAZIZ, M. A. et al. Heat treatment effect on 17-4PH stainless steel manufactured by Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM). **Procedia CIRP**, v. 104, p. 935–938, 1 jan. 2021.

CARROLL, B. E.; PALMER, T. A.; BEESE, A. M. Anisotropic tensile behavior of Ti–6Al–4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing. **Acta Materialia**, v. 87, p. 309–320, abr. 2015.

CECHMÁNEK, D. et al. A Structural Design of the Injection Mould. **Transportation Research Procedia**, v. 74, p. 576–583, 1 jan. 2023.

CÉSAR RABUSKI GARCIA, M. **Fundamentos de Projeto de Ferramentas**. 2009.

CHEMKHI, M. et al. **Effects of Mechanical Post-Treatments on Additive Manufactured 17-4PH Stainless Steel Produced by Bound Powder Extrusion**. *Procedia CIRP. Anais...Elsevier B.V.*, 2021.

COSTA, H. N. DA. **MOLDAGEM, CICLO E ETAPAS DE MOLDAGEM - Molde Injeção Plásticos**. Disponível em: <<http://moldesinjeaoplasticos.com.br/moldagem-ciclo-e-etapas-de-moldagem/>>. Acesso em: 30 abr. 2024.

CZEPIEL, M.; BAŃKOSZ, M.; SOBCZAK-KUPIEC, A. Advanced Injection Molding Methods: Review. **Materials 2023, Vol. 16, Page 5802**, v. 16, n. 17, p. 5802, 24 ago. 2023.

DEBROY, T. et al. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. **Progress in Materials Science**, v. 92, p. 112–224, 1 mar. 2018.

DIZON, J. R. C. et al. 3D printed injection molds using various 3D printing technologies. **Materials Science Forum**, v. 1005 MSF, p. 150–156, 2020.

DJOKIKJ, J.; KANDIKJAN, T. DfAM: development of design rules for FFF. **Procedia CIRP**, v. 112, p. 370–375, 1 jan. 2022.

DU, X. et al. H13 tool steel fabricated by wire arc additive manufacturing: Solidification mode, microstructure evolution mechanism and mechanical properties. **Materials Science and Engineering: A**, v. 883, p. 145536, 6 set. 2023.

FERIOTTI, M. A. et al. APLICAÇÕES DA MANUFATURA ADITIVA E IMPRESSÃO 3D NA FABRICAÇÃO DE MOLDES PARA INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS. **Brazilian Journal of Production Engineering - BJPE**, p. 199–218, 22 set. 2021.

GADE, S.; VAGGE, S.; RATHOD, M. A Review on Additive Manufacturing – Methods, Materials, and its Associated Failures. **Advances in Science and Technology Research Journal**, v. 17, n. 3, p. 40–63, 2023.

GARDNER, L. Metal additive manufacturing in structural engineering – review, advances, opportunities and outlook. **Structures**, v. 47, p. 2178–2193, 1 jan. 2023.

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. **Additive Manufacturing Technologies**, p. 1–510, 2015.

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. Development of Additive Manufacturing Technology. **Additive Manufacturing Technologies**, p. 19–42, 2015.

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition. **Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, Second Edition**, p. 1–498, 1 jan. 2015.

GOHN, A. M. et al. Mold inserts for injection molding prototype applications fabricated via material extrusion additive manufacturing. **Additive Manufacturing**, v. 51, p. 102595, 1 mar. 2022.

GOKTAS, M.; GULDAS, A. Production of Plastic Injection Molds with Conformal Cooling Channels by Laminated Brazing Method. **Gazi University Journal of Science**, v. 33, n. 3, p. 780–789, 2020.

GOKULDOSS, P. K.; KOLLA, S.; ECKERT, J. Additive manufacturing processes: Selective laser melting, electron beam melting and binder jetting-selection guidelines. **Materials**, v. 10, n. 6, 2017.

GONG, C. et al. 2D characterization at submicron scale of crack propagation of 17-4PH parts produced by Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM) process. **Procedia Structural Integrity**, v. 34, p. 13–19, 1 jan. 2021.

GONZALEZ-GUTIERREZ, J. et al. **Additive manufacturing of metallic and ceramic components by the material extrusion of highly-filled polymers: A review and future perspectives.** *MaterialsMDPI AG*, , 18 maio 2018.

GONZALEZ-MORAN, A. K. et al. Improved mechanical and wear properties of H13 tool steel by nitrogen-expanded martensite using current-controlled plasma nitriding. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 25, p. 4139–4153, 1 jul. 2023.

HAJARE, D. M.; GAJBHIYE, T. S. Additive manufacturing (3D printing): Recent progress on advancement of materials and challenges. **Materials Today: Proceedings**, v. 58, p. 736–743, 1 jan. 2022.

HARADA, J. **Moldes Para Injeção De Termoplásticos.** 1^a ed. 2004.

HUANG, G.; WEI, K.; ZENG, X. Microstructure and mechanical properties of H13 tool steel fabricated by high power laser powder bed fusion. **Materials Science and Engineering: A**, v. 858, p. 144154, 14 nov. 2022.

HUANG, M.; ZHANG, Z.; CHEN, P. Effect of selective laser melting process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel helical micro-diameter spring. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 104, n. 5–8, p. 2117–2131, 1 out. 2019.

HUANG, Y. et al. Additive manufacturing: Current state, future potential, gaps and needs, and recommendations. **Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME**, v. 137, n. 1, 2015.

ISO. **ISO 9001:2015 - Quality management systems — Requirements.** Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/62085.html>>. Acesso em: 13 abr. 2024.

ISO. **ISO 20400:2017 - Sustainable procurement — Guidance.** Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/63026.html>>. Acesso em: 13 abr. 2024.

JAHAN, S. A.; EL-MOUNAYRI, H. Optimal Conformal Cooling Channels in 3D Printed Dies for Plastic Injection Molding. **Procedia Manufacturing**, v. 5, p. 888–900, 1 jan. 2016.

JOSÉ HORST, D.; DE ALMEIDA VIEIRA, R. **Additive Manufacturing at Industry 4.0: a Review** *International Journal of Engineering and Technical Research*. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.erpublication.org>.

KANISHKA, K.; ACHERJEE, B. Revolutionizing manufacturing: A comprehensive overview of additive manufacturing processes, materials, developments, and challenges. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 107, p. 574–619, 1 dez. 2023.

KANYILMAZ, A. et al. Role of metal 3D printing to increase quality and resource-efficiency in the construction sector. **Additive Manufacturing**, v. 50, p. 102541, 1 fev. 2022.

KAZMER, D. O. Injection Mold Design Engineering. **Injection Mold Design Engineering**, p. I–XXIV, 1 jan. 2022a.

KHARAT, V. J. et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. **Materials Today: Proceedings**, 10 nov. 2023.

KRIZSMA, S.; SUPLICZ, A. Monitoring and modelling the deformation of an aluminium prototype mould insert under different injection moulding and clamping conditions. **Results in Engineering**, v. 20, p. 101556, 1 dez. 2023.

LAKSHMANAN, R. et al. The convergence of lean management and additive manufacturing: Case of manufacturing industries. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 13, p. 100620, 1 abr. 2023.

LAURO, C. H. et al. Influência da variação do tamanho de grão austenítico na qualidade superficial no processo de microfresamento do aço AISI H13 endurecido. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 19, n. 3, p. 235–246, 1 jul. 2014.

LEI, F. et al. Microstructures and Mechanical Properties of H13 Tool Steel Fabricated by Selective Laser Melting. **Materials**, v. 15, n. 7, 1 abr. 2022.

LEÓN-CABEZAS, M. A.; MARTÍNEZ-GARCÍA, A.; VARELA-GANDÍA, F. J. Innovative advances in additive manufactured moulds for short plastic injection series. **Procedia Manufacturing**, v. 13, p. 732–737, 1 jan. 2017.

LI, M. et al. Metal binder jetting additive manufacturing: A literature review. **Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME**, v. 142, n. 9, 1 set. 2020.

LI, S. et al. Developing cost-effective indirect manufacturing of H13 steel from extrusion-printing to post-processing. **Additive Manufacturing**, v. 62, p. 103384, 25 jan. 2023.

LIVERANI, E. et al. Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 249, p. 255–263, 1 nov. 2017.

Make: 3D printing CNC Machine Injection Molding - Dassault Systèmes®. Disponível em: <<https://make.3dexperience.3ds.com/processes/powder-bed-fusion>>. Acesso em: 8 out. 2024.

MARKFORGED. Markforged Metal 3D Printer: The Metal X 3D Printing System. Disponível em: <<https://markforged.com/3d-printers/metal-x>>. Acesso em: 4 maio. 2024.

MESQUITA, R. A. Tool steels: Properties and performance. **Tool Steels: Properties and Performance**, p. 1–245, 19 dez. 2016.

MONFARED, V. et al. **Science and Technology of Additive Manufacturing Progress: Processes, Materials, and Applications. Metals and Materials International** Korean Institute of Metals and Materials, , 1 dez. 2023.

MONTUORI, R. A. M. et al. Manufatura Aditiva de Aço Inoxidável 316L por Fusão Seletiva a Laser. **Soldagem & Inspeção**, v. 25, p. e2530, 28 set. 2020.

MOSTAFAEI, A. et al. Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges. **Progress in Materials Science**, v. 119, p. 100707, 1 jun. 2021.

MUHAMMED, M. et al. Enhancing the Tribological Performance of Tool Steels for Wood-Processing Applications: A Comprehensive Review. **Metals 2023, Vol. 13, Page 1460**, v. 13, n. 8, p. 1460, 14 ago. 2023.

NAZIR, A. et al. Multi-material additive manufacturing: A systematic review of design, properties, applications, challenges, and 3D printing of materials and cellular metamaterials. **Materials & Design**, v. 226, p. 111661, 1 fev. 2023.

NGO, T. D. et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. **Composites Part B: Engineering**, v. 143, p. 172–196, 15 jun. 2018.

NI, X. et al. Effect of Process Parameters on the Mechanical Properties of Hastelloy X Alloy Fabricated by Selective Laser Melting. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 28, n. 9, p. 5533–5540, 1 set. 2019.

NYAMEKYE, P. et al. Sustainability aspects of additive manufacturing: Leveraging resource efficiency via product design optimization and laser powder bed fusion. **Heliyon**, v. 10, n. 1, p. e23152, 15 jan. 2024.

OLIVEIRA, A. P. et al. Effect of microstructure and defect formation on the bending properties of additive manufactured H13 tool steel. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 15, p. 3598–3609, 1 nov. 2021.

OLIVEIRA, A. P. et al. Application of the Box-Behnken Design in the Optimization of Laser Powder Bed Fusion of H13 Tool Steel. **Materials Research**, v. 26, 2023.

PARK, H. S. et al. Design of Advanced Injection Mold to Increase Cooling Efficiency. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology**, v. 7, n. 2, p. 319–328, 1 mar. 2020.

PELIN, G.; SONMEZ, M.; PELIN, C.-E. The Use of Additive Manufacturing Techniques in the Development of Polymeric Molds: A Review. **Polymers 2024, Vol. 16, Page 1055**, v. 16, n. 8, p. 1055, 11 abr. 2024.

PELLEGRINI, A.; GUERRA, M. G.; LAVECCHIA, F. Shrinkage evaluation and geometric accuracy assessment on 17–4 PH samples made by material extrusion additive manufacturing. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 109, p. 394–406, 17 jan. 2024.

PEREIRA, R. J. R.; DE ALMEIDA, F. A.; GOMES, G. F. A multiobjective optimization parameters applied to additive manufacturing: DOE-based approach to 3D printing. **Structures**, v. 55, p. 1710–1731, 1 set. 2023.

RABELO ROCHA, P.; SILVA ROMERO, T.; JOÃO CARLOS DE FREITAS LOUREIRO, M. **ANÁLISE DA IMPRESSÃO 3D POR SINTERIZAÇÃO DIRETA DE METAL A LASER (DMLS) NA CONFECCÃO DE PEÇAS METÁLICAS.** 2023.

RAFI, H. K. et al. Microstructures and mechanical properties of Ti6Al4V parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 22, n. 12, p. 3872–3883, dez. 2013.

RAN, J. et al. Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Fabricated by Electron Beam Melting. **Crystals 2020, Vol. 10, Page 972**, v. 10, n. 11, p. 972, 27 out. 2020.

SADAF, M. et al. Advancements in Metal Additive Manufacturing: A Comprehensive Review of Material Extrusion with Highly Filled Polymers. **Journal of Manufacturing and Materials Processing 2024, Vol. 8, Page 14**, v. 8, n. 1, p. 14, 16 jan. 2024.

SADAF, M. et al. **Advancements in Metal Additive Manufacturing: A Comprehensive Review of Material Extrusion with Highly Filled Polymers.** **Journal of Manufacturing and Materials Processing** Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), , 1 fev. 2024.

ŠAFKA, J.; ACKERMANN, M.; VOLESKÝ, L. **Structural properties of H13 tool steel parts produced with use of selective laser melting technology.** *Journal of Physics: Conference Series.* **Anais...** Institute of Physics Publishing, 4 maio 2016.

SANGUEDOLCE, M. et al. Functionalized additively manufactured parts for the manufacturing of the future. **Procedia Computer Science**, v. 180, p. 358–365, 1 jan. 2021.

SHINDE, M. S.; ASHTANKAR, K. M. **Additive manufacturing-assisted conformal cooling channels in mold manufacturing processes.** **Advances in Mechanical Engineering** SAGE Publications Inc., , 1 maio 2017.

SING, S. L. et al. **Laser and electron-beam powder-bed additive manufacturing of metallic implants: A review on processes, materials and designs.** **Journal of Orthopaedic Research** John Wiley and Sons Inc., , 1 mar. 2016.

SINGH, G. et al. Additive manufacturing of 17–4 PH steel using metal injection molding feedstock: Analysis of 3D extrusion printing, debinding and sintering. **Additive Manufacturing**, v. 47, p. 102287, 1 nov. 2021.

SPILLER, S.; KOLSTAD, S. O.; RAZAVI, N. Fabrication and characterization of 316L stainless steel components printed with material extrusion additive manufacturing. **Procedia Structural Integrity**, v. 42, p. 1239–1248, 1 jan. 2022.

SRIVASTAVA, M. et al. A review of various materials for additive manufacturing: Recent trends and processing issues. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 21, p. 2612–2641, 1 nov. 2022.

SUN, Y.; BAILEY, R.; MOROZ, A. Surface finish and properties enhancement of selective laser melted 316L stainless steel by surface mechanical attrition treatment. **Surface and Coatings Technology**, v. 378, p. 124993, 25 nov. 2019.

THIJS, L. et al. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V. **Acta Materialia**, v. 58, n. 9, p. 3303–3312, 1 maio 2010.

THOMPSON, M. K. et al. Design for Additive Manufacturing: Trends, Opportunities, Considerations and Constraints. **CIRP Annals**, v. 65, n. 2, p. 737–770, 2016.

VANDENBROUCKE, B.; KRUTH, J. P. Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts. **Rapid Prototyping Journal**, v. 13, n. 4, p. 196–203, 7 ago. 2007.

VAYSSETTE, B. et al. Surface roughness of Ti-6Al-4V parts obtained by SLM and EBM: Effect on the High Cycle Fatigue life. **Procedia Engineering**, v. 213, p. 89–97, 1 jan. 2018.

VENUKUMAR, S. et al. **A Review on Metal Binder Jetting 3D Printing**. E3S Web of Conferences. **Anais...EDP Sciences**, 6 out. 2023.

WANG, Y.; LEE, C. Design and Optimization of Conformal Cooling Channels for Increasing Cooling Efficiency in Injection Molding. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 13, n. 13, 1 jul. 2023.

WEN, T. et al. Ultrastrong and ductile synergy of additively manufactured H13 steel by tuning cellular structure and nano-carbides through tempering treatment. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 22, p. 157–168, 1 jan. 2023.

WENCHANG, W.; WEN, Z.; DEJUN, K. High-temperature tribological behaviours of H13 hot work mould steel by low-temperature plasma nitriding process. **Canadian Metallurgical Quarterly**, v. 62, n. 1, p. 58–70, 2 jan. 2023.

WIBERG, ANTON. **Towards Design Automation for Additive Manufacturing: A Multidisciplinary Optimization Approach**. [s.l.] Linkopings Universitet, 2019.

XU, T. Z. et al. Development and characterization of a novel maraging steel fabricated by laser additive manufacturing. **Materials Science and Engineering: A**, v. 891, p. 145975, 1 jan. 2024.

YANG, L. et al. Microstructure and mechanical properties of H13 steel block produced by wire arc additive manufacturing. **Materials Letters**, v. 358, p. 135777, 1 mar. 2024.

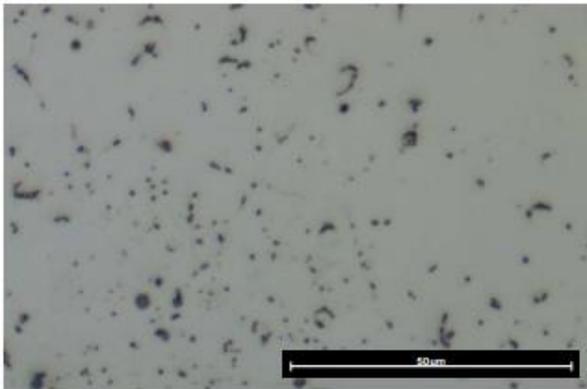
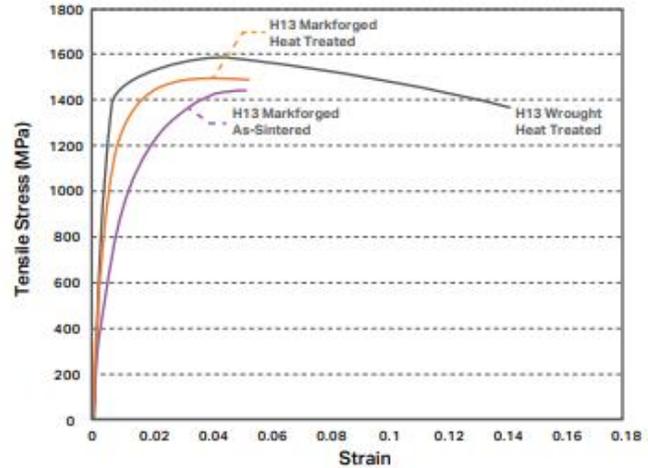
APÊNDICE A – Datasheet aço H13 para impressão 3D

MATERIAL DATASHEET



H13 Tool Steel

| Composition | Amount |
|-------------|-----------|
| Chromium | 4.7-5.5% |
| Molybdenum | 1.3-1.7% |
| Silicon | 0.8-1.2% |
| Vanadium | 0.8-1.2% |
| Carbon | 0.3-0.45% |
| Manganese | 0.2-0.5% |
| Phosphorous | 0.03% max |
| Sulfur | 0.03% max |
| Iron | bal |



● Markforged H13 As-Sintered

H13 Tool Steel printed on the Metal X, washed in the Wash-1, and sintered in the Sinter-1. As Sintered Microstructure is pictured to the left.

● Markforged H13 Heat Treated

H13 Tool Steel printed with the Metal X system, air quenched at 1010C, and double tempered at 600C.

● Wrought H13 Heat Treated

Wrought H13 tool steel standard from ASM Specialty Handbook - air quenched at 1010C and double tempered at 600C.

| Typical Mechanical Properties | Standard | Markforged As-Sintered | Markforged Heat Treated | Wrought Heat Treated* |
|-------------------------------|-----------|------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Ultimate Tensile Strength | ASTM E8 | 1420 MPa | 1500 MPa | 1580 MPa |
| 0.2% Yield Strength | ASTM E8 | 800 MPa | 1250 MPa | 1360 MPa |
| Elongation at Break | ASTM E8 | 5% | 5% | 14% |
| Hardness | ASTM E18 | 40 HRC | 45 HRC | 46 HRC |
| Relative Density | ASTM B923 | 94.5% | 94.5% | 100% |

These data represent typical values for Markforged H13 Tool Steel as-sintered and after heat treatment. Values were tested in house, and both material composition and "As-Sintered" data were confirmed by outside testing. These representative data were tested, measured, or calculated using standard methods and are subject to change without notice. Markforged makes no warranties of any kind, express or implied.

*Wrought Heat Treated data included in table only. Data from ASM Specialty Handbook: Tool Materials page 140

APÊNDICE B – Datasheet do material de injeção

| | |
|-------------------|--|
| DATA SHEET | LANXESS Energizing Chemistry |
|-------------------|--|

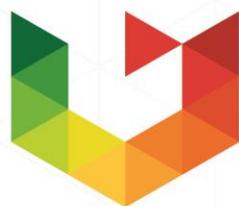
Durethan ECO PA GF30 909040

PA 6 (mainly), 30 % glass fibers, Injection molding, contains at least 80 % pre consumer recyclate, properties may change considerably from lot to lot

ISO Shortname: ISO 1874-PA 6/XX, GR, 14-080, GF30

| Property | Test Condition | Unit | Standard | guide value |
|---|----------------|-------------------|----------------------|--------------|
| | | | | d.a.m. cond. |
| Mechanical properties (23 °C/50 % r. h.) | | | | |
| C Tensile modulus | 1 mm/min | MPa | ISO 527-1,-2 | 8500 |
| C Tensile Stress at break | 5 mm/min | MPa | ISO 527-1,-2 | 135 |
| C Tensile Strain at break | 5 mm/min | % | ISO 527-1,-2 | 2.5 |
| C Charpy impact strength | 23 °C | kJ/m ² | ISO 179-1eU | 50 |
| Izod impact strength | 23 °C | kJ/m ² | ISO 180-1U | 40 |
| Flexural modulus | 2 mm/min | MPa | ISO 178-A | 7500 |
| Flexural strength | 2 mm/min | MPa | ISO 178-A | 210 |
| Flexural strain at flexural strength | 2 mm/min | % | ISO 178-A | 3.0 |
| Thermal properties | | | | |
| C Melting temperature | 10 °C/min | °C | ISO 11357-1,-3 | >210 |
| Other properties (23 °C) | | | | |
| C Water absorption (Saturation value) | Water at 23 °C | % | ISO 62 | 7.0 |
| C Water absorption (Equilibrium value) | 23 °C; 50 % RH | % | ISO 62 | 2.1 |
| C Density | | kg/m ³ | ISO 1183 | 1360 |
| Processing conditions for test specimens | | | | |
| C Injection molding-Melt temperature | | °C | ISO 294 | 280 |
| C Injection molding-Mold temperature | | °C | ISO 294 | 80 |
| Processing recommendations | | | | |
| Drying temperature dry air dryer | | °C | - | 80 |
| Drying time dry air dryer | | h | - | 2-6 |
| Residual moisture content | | % | Acc. to Karl Fischer | 0.03-0.12 |
| Melt temperature (Tmin - Tmax) | | °C | - | 270-290 |
| Mold temperature | | °C | - | 80-120 |

C These property characteristics are taken from the CAMPUS plastics data bank and are based on the international catalogue of basic data for plastics according to ISO 10350.



UPF

UNIVERSIDADE
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900
(54) 3316 7000 - www.upf.br