

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**APLICAÇÃO DE MANUFATURA ADITIVA METÁLICA (MAM) PELO
PROCESSO FDM NO DESENVOLVIMENTO DE COMPONENTES PARA
MOLDES DE INJEÇÃO
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

DANIEL DE SOUZA MONTEIRO

RIO GRANDE

2023

DANIEL DE SOUZA MONTEIRO

**APLICAÇÃO DE MANUFATURA ADITIVA METÁLICA (MAM) PELO
PROCESSO FDM NO DESENVOLVIMENTO DE COMPONENTES PARA
MOLDES DE INJEÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”.

Orientador: Jorge Luis Braz Medeiros

RIO GRANDE

2023

Ficha Catalográfica

M775a Monteiro, Daniel de Souza.

Aplicação de manufatura aditiva metálica (MAM) pelo processo FDM no desenvolvimento de componentes para moldes de injeção / Daniel de Souza Monteiro. – 2023.

99 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio Grande/RS, 2023.

Orientador: Dr. Jorge Luis Braz Medeiros.

1. Manufatura aditiva metálica 2. Impressão 3D metálica
3. Aços inoxidáveis 17 4PH 4. Sinterização 5. Moldes de injeção
I. Medeiros, Jorge Luis Braz II. Título.

CDU 621

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PPMec



Ata nº 6/2023 da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos dezoito dias do mês de abril de dois mil e vinte e três, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às dez horas, online via web conferência, a que se submeteu o mestrando **DANIEL DE SOUZA MONTEIRO**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa Engenharia de soldagem e materiais, com o seguinte título: **APLICAÇÃO DE MANUFATURA ADITIVA METÁLICA (MAM) PELO PROCESSO FDM NO DESENVOLVIMENTO DE COMPONENTES DE MOLDES DE INJEÇÃO**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Jorge Luis Braz Medeiros e Luciano Volcanoglo Biehl e os convidados Gustavo Mendes Platt, Carlos Otávio Damas Martins e Carlos Alberto Mendes Moraes sob a presidência do Professor Jorge Luis Braz Medeiros. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Jorge Luis Braz Medeiros: Aprovado
2. Luciano Volcanoglo Biehl: Aprovado
3. Gustavo Mendes Platt: Aprovado
4. Carlos Otávio Damas Martins: Aprovado
5. Carlos Alberto Mendes Moraes: Aprovado

Foi concedido um prazo de 30 dias para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

1. _____
CPF: 588.871.210-87
Documento assinado digitalmente
gov.br JORGE LUIS BRAZ MEDEIROS
Data: 18/04/2023 14:02:45-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

2. _____
CPF: 575.195.100-00
Documento assinado digitalmente
gov.br LUCIANO VOLCANOGLO BIEHL
Data: 20/04/2023 16:33:43-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

3. _____
CPF: 044.087.637-05
Documento assinado digitalmente
gov.br GUSTAVO MENDES PLATT
Data: 18/04/2023 15:25:04-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

4. _____
CPF: 744.803.080-91
Documento assinado digitalmente
gov.br CARLOS OTÁVIO DAMAS MARTINS
Data: 18/04/2023 15:16:54-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

5. _____
CPF: 543.546.509-59
Assinado de forma digital
por DANIEL DE SOUZA
MONTEIRO:975959
Dados: 2023.04.20
16:25:03 -03'00'

Daniel De Souza Monteiro: 26068

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho à minha família pelo
carinho, compreensão e amor.*

AGRADECIMENTOS

Aproveito a oportunidade para agradecer inicialmente aos meus pais, pela educação, amor e a atenção a mim dedicada, pelas oportunidades dadas para que eu pudesse estudar, buscar conhecimento e experiência profissional e pessoal durante esta longa jornada que trilho desde criança. Obrigado por proporcionar momentos que muitas vezes não eram os caminhos mais fáceis, mas era a base forte necessária, de onde viria um grande aprendizado, que me condiciona hoje a enfrentar desafios maiores, com determinação e a crença de que para vencer é preciso acreditar e seguir.

Um agradecimento muito especial, com muito carinho e amor, a quem eu divido meus sucessos e meus fracassos e que está sempre me amparando, não importa o tamanho do desafio, minha amada esposa Tatiane, pela entrega incondicional, pela força que me transmite nos momentos que eu preciso de apoio, pela compreensão nos momentos mais tensos da minha jornada e pelo maior presente de ser pai de duas belas meninas, as quais eu direciono todas as minhas forças e atitudes. Saiba que graças ao teu apoio e a tua dedicação é que foi possível não só concluir mais esta etapa, mas todas as etapas importantes da minha vida acadêmica, profissional e pessoal. Certamente só existe um grande homem quando existe a companhia imparcial e atuante de uma grande mulher.

Muito obrigado à Maria Clara e à Carolina por me fazer realmente pensar que a vida vale a pena e me sentir um pai valorizado, amado e digno de confiança para ajudar na condução de qualquer assunto. Vocês me mostram em cada atitude tomada que todos estamos em um caminho comum, buscando viver uma vida íntegra, irretocável e dentro dos princípios pelos quais sempre prezamos.

Meu muito obrigado ao meu orientador, amigo e estimado professor Jorge Luis Braz Medeiros por identificar em mim um aluno potencial para encarar este grande desafio que foi realizar esse projeto acadêmico, me dando suporte profissional e até mesmo emocional nas horas de dificuldades de cunho profissional e pessoal. O teu trabalho como professor e orientador foram irretocáveis e com a experiência adquirida nesse período em que fui teu aluno,

pude perceber o quanto a pesquisa e o desenvolvimento trazem de benefício para o conhecimento e são determinantes para o sucesso, norteando os caminhos para um futuro de prosperidade, maturidade e responsabilidade.

Quero agradecer aos sócios e colegas de trabalho das empresas SULINJECT Ltda., à qual faço parte como sócio administrador, e aos colegas e gestores da empresa TECNOMIM por ter conduzido os assuntos referente às práticas acadêmicas de forma muito profissional, com responsabilidade nos registros dos dados necessários para o experimento e na disponibilidade para sanar todas as dúvidas referentes a cada etapa do desenvolvimento e por disponibilizar a estrutura de fornos para o processo de debinding e sinterização e estrutura de medição tridimensional, de fundamental importância para a validação das etapas do estudo.

Por fim um agradecimento geral a todos não citados, mas que de alguma forma contribuíram para que a pesquisa fosse desenvolvida de forma consistente e não mediram esforços para me auxiliar desde a aquisição de materiais, até uma opinião sobre as boas práticas que poderiam ser aplicadas ao estudo e ao complemento didático do mesmo. Acredito que mentes que convergem para o bem comum podem corroborar e construir juntos um ambiente promissor, que me motiva a continuar me desenvolvendo e contribuindo para o aprimoramento das competências de novos profissionais ao mercado.

RESUMO

Nas últimas décadas os avanços tecnológicos em materiais e processos tem propiciado inovações com potencialidades capazes de revolucionar os processos de fabricação. Entre estes processos, pode ser destacada a manufatura aditiva metálica (MAM), propiciando rápidas respostas inicialmente a componentes sobressalentes e de complexidade elevada. Uma das rotas de fabricação por manufatura aditiva metálica que tem se destacado, utiliza como filamento os mesmos feedstocks do processo Metal Injection Molding (MIM), com base de poliacetal como aglutinante. Os principais filamentos desenvolvidos pela empresa são o aço inoxidável austenítico Catamold 316L Fusion e o aço inoxidável endurecido por precipitação Catamold 17 4 PH. Neste estudo foi desenvolvido inserto para moldes de injeção de polímeros com o aço inoxidável endurecidos por precipitação catamold 17 4 PH. Após a modelagem computacional, a impressão 3 D foi realizada definindo-se os melhores parâmetros de velocidade, aquecimento em condições, onde as deformações e o nível de porosidade fossem minimizadas. Na etapa seguinte, a extração do polímero (debiding) foi realizada com vapor aquecido de ácido nítrico com grau de pureza de 99,999% em forno com atmosfera controlada. Posteriormente o inserto foi sinterizado em forno de atmosfera controlada com hidrogênio na temperatura de 1330 °C. A partir do inserto sinterizado, foram aplicadas algumas etapas complementares de usinagem, caracterizada a resistência mecânica do material, verificado o dimensional e após a colocação dos insertos no porta molde, as peças poliméricas foram injetadas. Os resultados demonstraram que o inserto desenvolvido pela tecnologia de impressão 3D FDM apresenta elevado potencial para aplicação em moldes de injeção, podendo a vida útil do inserto ser melhorada com aplicação de tratamento térmico de solubilização e envelhecimento do substrato. Com a utilização de engenharia de superfície, com processos de difusão como nitretação à plasma ou depósitos de filmes finos como PVD, DLC e outros é possível melhorar a vida em fadiga e as propriedades tribológicas dos produtos gerados por esta tecnologia. Conclui-se que a manufatura aditiva metálica representa o estado da arte na fabricação mecânica, porém com muitas lacunas. Se por um lado, os custos foram maiores para a fabricação pelo processo MAM, o tempo de fabricação se mostrou bastante reduzido, próximo de cinco vezes menor que a usinagem convencional. Houve necessidade de acabamento das superfícies para possibilitar a extração e os tempos de injeção de ambos foram idênticos, considerando que não pôde ser aplicada a refrigeração. Nos próximos anos devem ser realizadas pesquisas que irão aumentar a produtividade, reduzir custos e revolucionar a área de projeto e fabricação de moldes de elevada complexidade.

Palavras-chave: Manufatura aditiva metálica; Impressão 3D metálica; Aços inoxidáveis 17 4PH; Sinterização; Moldes de injeção.

ABSTRACT

In recent decades, technological advances in materials and processes have provided innovations with potential to revolutionize the manufacturing processes. Among these processes can be highlighted the metallic additive manufacturing (MAM), providing quick responses initially to spare components and high complexity. One of the manufacturing routes by metallic additive manufacturing that has stood out uses as filament the same feedstocks of the Metal Injection Molding (MIM) process, with polyacetal base as binder. The main filaments developed by the company are the austenitic stainless steel Catamold 316L Fusion and the precipitation-hardened stainless steel Catamold 17 4 PH. In this study, an insert for polymer injection molds was developed with the Catamold 17 4 PH precipitation-hardened stainless steel. After computational modeling, 3 D printing was performed by defining the best parameters for speed, heating under conditions, where deformations and porosity level were minimized. In the next step the polymer extraction (debiding) was carried out with heated nitric acid vapor with a purity of 99.999% in a controlled atmosphere oven. Subsequently, the insert was sintered in a controlled atmosphere furnace with hydrogen at a temperature of 1330 °C. From the sintered insert, some additional machining steps were applied, the mechanical strength of the material was characterized, the dimensional was verified and after placing the inserts in the mold base, polymeric parts were injected. The results showed that the insert developed by FDM 3D printing technology presents a high potential for application in injection molds, and the insert life can be improved with the application of heat treatment of solubilization and aging of the substrate. With the use of surface engineering, with diffusion processes like plasma nitriding or thin film deposits like PVD, DLC and others it is possible to improve the fatigue life and tribological properties of the products generated by this technology. We conclude that metal additive manufacturing represents the state of the art in mechanical manufacturing, but with many gaps. If on the one hand the costs were higher for manufacturing by the MAM process, the manufacturing time was greatly reduced, close to five times shorter than conventional machining. There was a need to finish the surfaces to enable extraction and the injection times of both were identical, considering that refrigeration cannot be applied. In the next few years, research that will increase productivity, reduce costs, and revolutionize the area of design and manufacturing of highly complex molds should be conducted.

Keywords: Metal additive manufacturing; 3D metal printing; Stainless steels 17 4PH; Sintering; Injection molds

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mecanismo esquemático do processo FDM	19
Figura 2 - Ilustração do sistema de cama de pó.....	23
Figura 3 - Ilustração do sistema de alimentação de pó	23
Figura 4 - Ilustração do sistema de alimentação por fio	24
Figura 5 - Resultado do teste de tração (orientação em plano ZX)	27
Figura 6 - Resultado do teste de tração	30
Figura 7 - Desenho esquemático para o sistema baseado por parafuso e pistão	31
Figura 8 - Comparação entre insertos com e sem interface com SLM.....	34
Figura 9 - Comparação entre fluxo com passagem livre e suporte interno	35
Figura 10 - Fluxograma metodológico.....	36
Figura 11 - Componentes fabricados por manufatura aditiva.....	38
Figura 12 - Material Ultrafuse 17 4-PH BASF.....	39
Figura 13 - Relação impressão x sinterização.....	41
Figura 14 - Fontes dissipadoras de calor inserto lado fixo	42
Figura 15 - Componente impresso por FDM	43
Figura 16 - Componente após Debinding.....	45
Figura 17 - Equipamento utilizado para ensaio de tração	47
Figura 18 - Corpos de prova utilizados para o ensaio de tração	47
Figura 19 - Molde impresso pelo processo FDM.....	50
Figura 20 - Molde impresso pelo processo FDM.....	51
Figura 21 - Variação percentual do diâmetro dos furos extratores (lado móvel)	52
Figura 22 - Variação dimensional do eixo Z (lado móvel)	53
Figura 23 - Variação dimensional dos eixos X e Y (lado móvel)	54
Figura 24 - Variação dimensional dos eixos X e Y (lado fixo)	54
Figura 25 - Variação dimensional do eixo Z (lado fixo)	55
Figura 26 - Variação dimensional dos diâmetros (lado fixo).....	56
Figura 27 - Defeitos no processo pós debinding	57
Figura 28 - Gráfico do ciclo de sinterização dos componentes	58
Figura 29 - Gráfico de ponto de orvalho na sinterização dos componentes.....	59
Figura 30 - Trincas na cavidade após a sinterização	59

Figura 31 - Deformações após a sinterização do componente lado fixo	60
Figura 32 - Variação dimensional dos eixos X e Y (lado móvel)	62
Figura 33 - Variação dimensional do eixo Z (lado móvel)	63
Figura 34 - Variação dimensional dos diâmetros de 3mm (lado móvel).....	63
Figura 35 - Comparação da variação dimensional entre os diâmetros	64
Figura 36 - Variação dimensional dos eixos X e Y (lado fixo)	65
Figura 37 - Variação dimensional do eixo Z (lado fixo)	66
Figura 38 - Variação dimensional do eixo Z (lado fixo)	66
Figura 39 - Inserto ISCAR e suporte utilizados para faceamento.....	67
Figura 40 - Fixação do componente impresso na máquina.....	68
Figura 41 - Fresa de topo Ø16mm utilizada para a calibração.....	68
Figura 42 - Análise visual desgaste antes e após operação de faceamento....	69
Figura 43 - Resultado das operações de calibração	70
Figura 44 - Usinagem dos componentes lado fixo e móvel (material bruto) ...	71
Figura 45 - Eletro erosão por penetração do componente lado fixo.....	72
Figura 46 - Relação diâmetro x profundidade para usinagem.....	72
Figura 47 - Comparação entre acabamentos dos componentes	74
Figura 48 - Comparação entre acabamentos dos componentes.....	76
Figura 49 - Primeiro teste de injeção conjunto usinado a partir do bloco bruto	77
Figura 50 - Primeiro teste de injeção do componente impresso em FDM.....	78
Figura 51 - Repasse para aumento da espessura do componente impresso ..	79
Figura 52 - Usinagem da retenção no componente lado móvel	80
Figura 53 - Usinagem para redução da textura do componente impresso.....	80
Figura 54 - Amostras injetadas no segundo teste do molde	81
Figura 55 - Resultado do ensaio de tração.....	82
Figura 56 - Comparação entre seções de corpos de prova	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Contração por eixo do filamento Ultrafuse 17 4PH	40
Tabela 2 - Parâmetros para impressão	43
Tabela 3 - Parâmetros do processo de debinding	44
Tabela 4 - Parâmetros do processo de sinterização	45
Tabela 5 - Dimensões do corpo de prova	48
Tabela 6 - Comparativo entre parâmetros de impressão FDM.....	52
Tabela 7 - Comparação da contração teórica x prática (lado móvel)	61
Tabela 8 - Comparação da contração teórica x prática (lado fixo)	64
Tabela 9 - Operações para usinar componentes a partir de bloco bruto.....	70
Tabela 10 - Custo de fabricação da peça impressa	74
Tabela 11 - Custo de fabricação da peça usinada a partir do bloco bruto	75
Tabela 12 - Parâmetros de injeção	77
Tabela 13 - Comparação entre os processos usinado x impresso.....	82
Tabela 14 - Resultado das propriedades mecânicas do ensaio de tração	83

LISTA DE ANEXOS

ANEXO I - Filamento Ultrafuse 17-4PH	95
ANEXO II - Desenho para relatório dimensional do componente lado fixo	97
ANEXO III - Desenho para relatório dimensional do componente lado móvel .	98
ANEXO IV - Relatório dimensional das peças verde.....	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

CAD – *Computer Aided Design*

PVD – *Physical Vapor Deposition*

DLC – *Diamond-Like Carbon*

FDM – *Fused Deposition Modeling*

SLA – Estereolitografia

SLS – *Selective Laser Sintering*

SLM – *Selective Laser Melting*

UV - Ultravioleta

PLA – Ácido polilático

EBM – *Electron Beam Melting*

PVC – Policreto de vinila

PA – Poliamida

TiN – Nitreto de titânio

NH₃ – composição química da amônia

MIM – *Metal injection molding*

SS – *Stainless Steel*

δ – Delta

CNC – Comando numérico computadorizado

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. OBJETIVO GERAL	17
1.1.1 Objetivos específicos	17
2. FUNDAMENTAÇÃO teórica.....	18
2.1 ASPECTOS GERAIS DA MANUFATURA ADITIVA POR EXTRUSÃO DE MATERIAL	18
2.2 UTILIZAÇÃO DE COMPONENTES MECÂNICOS FABRICADOS POR MANUFATURA ADITIVA METÁLICA	21
2.3 CARACTERÍSTICAS DO AÇO 17 4PH E APLICAÇÕES NA MANUFATURA ADITIVA	26
2.4 APLICAÇÕES DO METAL INJECTION MOULDING NA INDÚSTRIA....	28
2.5 MELHORIA DA EFICIÊNCIA DOS MOLDES DE INJEÇÃO	31
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
3.1 PROJETO DO MOLDE	37
3.1.1 Aplicação	37
3.1.2 Material	38
3.1.3 Dimensões	41
3.1.4 Refrigeração	41
3.2 FABRICAÇÃO	42
3.2.1 Impressão 3D Metálica	43
3.2.2 Debinding.....	44
3.2.3 Sinterização	45
3.2.4 Usinagem.....	45
3.3 INJEÇÃO	46
3.3.1 Acabamento.....	46
3.3.2 Número de ciclos	46
3.3.3 Tempo de injeção	46
3.4 ENSAIO DE TRAÇÃO.....	47
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1 PROJETO DO MOLDE	49
4.1.1 Aplicação	49
4.1.2 Material	50
4.1.3 Dimensões	51
4.2 FABRICAÇÃO.....	51

4.2.1 Impressão 3D metálica	51
4.2.2 Debinding.....	56
4.2.3 Sinterização	57
4.2.4 Usinagem.....	67
4.2.5 Custo x prazo de fabricação dos componentes	74
4.2.6 Injeção	76
4.2.7 Comparação entre processos.....	81
4.3 ENSAIO DE TRAÇÃO.....	82
5. CONCLUSÕES	85
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	89
7. REFERÊNCIAS.....	90
7.1 Referências nominais.....	90
7.2 Referências por Estrato	90
7.3 Referências por Qualis.....	93
7.4 Referências por Data dos Artigos	93
8. anexos.....	95

1. INTRODUÇÃO

Frente ao progresso na qualidade das geometrias metálicas criadas por processos de manufatura aditiva, a possibilidade de utilizar-se da tecnologia de Moldagem por Fusão e Deposição – FDM (Fused Deposition Modeling) e de um filamento composto de polímero e pó metálico, aliado ao processo de sinterização, representa uma possibilidade bastante eficiente.

A manufatura aditiva por extrusão de material (FDM) é um processo de deposição de camadas de um polímero ou uma blenda polimérica, em que um filamento é aquecido por uma resistência, definida pela temperatura de plastificação de cada polímero, perfilado por um bico extrusor e então depositado camada por camada, previamente definido, em uma mesa de impressão, em que é resfriado até temperatura ambiente e solidifica na forma final (NGO, Tuan D. *et al.*, 2018).

Processos de impressão polimérica, já têm sido utilizados como recurso para a viabilidade de peças injetadas através da impressão 3D de cavidades que, inseridas em um porta molde padrão, proporcionam a criação de lotes rápidos de peças piloto ou até mesmo pequenos lotes de itens de um determinado segmento.

Porém, essas cavidades têm um ciclo de vida curto e a gama de polímeros, que podem ser injetados são limitados a materiais com características que não agredem a superfície do molde e até mesmo injetam em uma faixa de temperatura, e que permite ao material impresso garantir a geometria sem deformações ou empenamentos.

Desta forma, pesquisas para desenvolvimento de novos filamentos para o segmento de peças sinterizadas, representa ao mercado soluções importantes que podem gerar reduções significativas em investimentos com ferramentas e no tempo de desenvolvimento de protótipos e pequenos lotes (TOFAIL *et al.*, 2018).

Apesar dos ótimos resultados do ponto de vista de propriedades mecânicas, melhoria da eficiência energética e na expressiva redução de resíduos, os custos de equipamento e insumos ainda distam da realidade de serem aplicados para competir com os processos de fabricação convencionais (SEIFI *et al*, 2016).

Nesta senda, utilizando-se de uma máquina de extrusão de metal de um custo acessível, acende a possibilidade de se pensar em geometrias complexas, com otimizações para fabricação de componentes de moldes, que não se imaginava antes com os processos de usinagem tradicionais, o que pretende-se com esta pesquisa.

O material pode ser ajustado para o melhor resultado no desempenho do produto final, que associado a parâmetros específicos de processos, podem atingir níveis permissíveis para a característica desejada: acabamentos superficiais, porosidades, entre outros (TOFAIL *et al.*, 2018).

Salientando o que de melhor tem-se em cada processo, a impressão FDM de filamentos formados da combinação entre polímeros e pós metálicos é uma solução eficiente, em que temos a tecnologia da impressão em um custo bastante acessível, se comparado ao processo SLS e SLM, insumos com preços competitivos e utilizando exatamente dos mesmos recursos de um processo de sinterização, já consagrado para a fabricação de peças em Metal Injection Molding.

As cavidades geradas pelo processo de impressão de pós metálicos trazem vantagens de redução de tempo expressivas, se comparadas ao processo de fabricação convencional, permitindo gerar geometrias complexas e a liberdade de pensar em processos de troca de calor dinâmicos e de maior eficiência, sem comprometer em resistência mecânica, com possibilidade de aumento de dureza através de processos termoquímicos e sonhar nos desafios a pensar em maiores volumes de produção se comparado às cavidades geradas por impressão de materiais poliméricos (MARIN *et al.*, 2021).

1.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa é a obtenção de insertos para moldes de injeção utilizando o processo FDM. Para tanto, a pesquisa foi desenvolvida, utilizando-se o aço inoxidável endurecido por precipitação catamold 17 4 PH. Inicialmente, executou-se a modelagem computacional, e a impressão 3 D foi realizada. Na etapa seguinte, a extração do polímero (debinding) foi realizada em forno com atmosfera controlada. Posteriormente, o inserto foi sinterizado em forno de atmosfera controlada com hidrogênio na temperatura de 1330°C. A partir do inserto sinterizado, foram aplicadas algumas etapas complementares de usinagem e após a colocação dos insertos no porta molde, as peças poliméricas foram injetadas. Após, foi submetido ao ensaio de tração, três corpos de prova, projetados de acordo com a norma ASTM E8-E8M, impressos no mesmo ciclo de impressão e sinterizados na mesma carga de sinterização.

1.1.1 Objetivos específicos

Abaixo são indicados os objetivos específicos:

- Definir o filamento compósito a ser utilizado.
- Determinar os parâmetros de debinding e sinterização.
- Avaliar se a qualidade superficial do componente obtido por extrusão de material atende às necessidades de um componente fabricado para ser utilizado em moldes de injeção.
- Conhecer as restrições dimensionais do componente e as possibilidades de aplicações de processos de usinagem para qualificação das geometrias.
- Comparar custo x prazo de fabricação dos componentes lado fixo e lado móvel entre os dois processos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo os temas serão descritos para estruturar o assunto escolhido para a pesquisa, sendo abordado aspectos sobre os processos de manufatura aditiva por extrusão de material polimérico, o composto polimérico com pós de aço, e o processo de metal injection molding. Também estará descrito, o processo de injeção polimérica, detalhando principalmente a influência da refrigeração e os seus benefícios.

2.1 ASPECTOS GERAIS DA MANUFATURA ADITIVA POR EXTRUSÃO DE MATERIAL

O processo de manufatura aditiva começou em 1986, e na época foi definido como estereolitografia (SLA), utilizado inicialmente para criação de protótipos e hoje vem transformando o mercado como uma opção não só para prototipagem, mas também como ferramenta importante para produção de componentes na indústria automotiva, construção civil, biomecânica, entre outros (NGO, Tuan D. *et al.*, 2018).

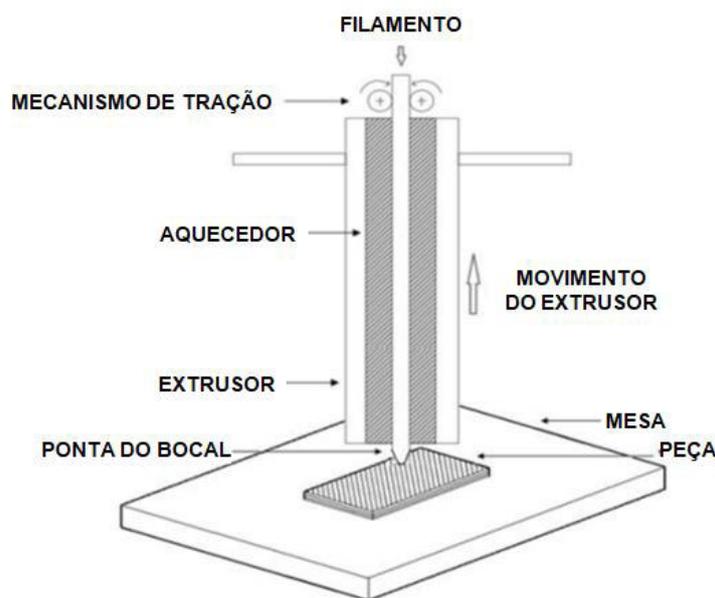
Os processos de manufatura aditiva já em aplicação na indústria são (ZEGARD e PAULINO, 2016):

- Modelagem por deposição fundida (FDM): produto produzido por deposição de material em camadas;
- Estereolitografia (SLA): camadas produzidas por líquido fotopolímero e curadas por um feixe laser UV;
- PolyJet: similar ao SLA e o fotopolímero é depositado e rapidamente curado pela luz UV;
- SLS e SLM: são processos similares, em que uma camada de pó é depositada e o laser, com base na geometria desejada, faz a fusão do polímero (SLS) ou faz a sinterização do pós metálico (SLM).

Em 1988 o processo de manufatura aditiva por extrusão de material, ou modelagem por deposição fundida foi patenteado por Crump, que posteriormente criou a Stratasys Corporation em 1989 (VYAVAHARE, Swapnil *et al.*, 2020).

A manufatura aditiva por extrusão de material (FDM) é um processo de deposição de camadas de um polímero ou uma blenda polimérica, em que um filamento é aquecido por uma resistência, definida pela temperatura de plastificação de cada polímero, perfilado por um bico extrusor e então depositado camada por camada, previamente definido, em uma mesa de impressão, em que é resfriado até temperatura ambiente e solidifica na forma final (NGO, Tuan D. *et al.*, 2018).

Figura 1 - Mecanismo esquemático do processo FDM



Fonte: Adaptado de VYAVAHAR *et al.* (2020)

A fusão entre as camadas ocorre em diferentes sentidos entre elas, sendo que uma camada de material no estado de fusão é depositada sobre uma camada de material solidificado, criando um vínculo entre as camadas. Esses laços criados entre as camadas garantem uma resistência na peça impressa, mas que não se assemelha aos processos convencionais, o que é um desafio para a evolução do processo FDM, que vem a cada dia crescendo. (VYAVAHARE, Swapnil *et al.*, 2020).

Muitos materiais estão sendo desenvolvidos para serem adaptado para o processo FDM. Existem desenvolvimentos envolvendo materiais com misturas de pó a base de amido de milho (ácido láctico – PLA), materiais eletricamente condutores, materiais biocompatíveis para substituir parte de ossos humanos, além de materiais estruturais, compostos metálicos para impressão de chapas metálicas, materiais poliméricos com boa resistência mecânica, tipo Acrilonitrila butadieno estireno e poliamida (VYAVAHARE, Swapnil *et al.*, 2020).

Estudos também são desenvolvidos constantemente sobre os parâmetros de impressão, orientação, sentido da impressão, espessura da camada, multiplicador de extrusão. A parametrização correta resulta em um aumento significativo da resistência do produto final, mesmo utilizando impressora de código aberto. Por exemplo, a altura de camada tem efeito direto na resistência a tração, resistência a flexão e resistência ao impacto. Outro exemplo importante, se comparado a uma peça moldada por injeção, o sentido do preenchimento reduz ou aumenta a resistência à tração significativamente. Ao se aproximar de um ângulo de preenchimento de 90° percebe-se uma redução significativa da resistência à tração, com o ângulo 0° até em torno de 45° uma faixa adequada para atender à resistência à tração e ao impacto. Ângulos próximos de 0° ou 90° são faixas adequadas para melhor resistência à flexão (RAJPUROHIT *et al.*, 2019).

Parâmetros significativos que determinam uma boa qualidade na impressão 3D por extrusão são a temperatura de extrusão, espessura da camada, multiplicador de extrusão e velocidade do bocal (SINGH *et al.*, 2021).

Um grande desafio tem sido pauta de muitos trabalhos e propostas para a evolução dos materiais de manufatura aditiva. Como os processos convencionais já estão consolidados na indústria e são objetos de longos anos de estudo e desenvolvimento, o mercado conta com processos consolidados nas atividades industriais, com conhecimento técnico suficiente para que as demandas sejam muito bem controladas, com materiais homogêneos em sua composição e estrutura. Na manufatura aditiva, esse cenário ainda conta com certas instabilidades, em que os processos de obtenção podem variar o

resultado nas características do produto final (fusão de pó ou extrusão de filamento por exemplo). Há uma evolução na tecnologia de manufatura aditiva com a adição de pós metálicos. A composição de materiais, é determinada em função do processo de manufatura aditiva utilizado. O material pode ser ajustado para o melhor resultado no desempenho do produto final, que associado a parâmetros específicos de processos, podem atingir níveis permissíveis para a característica desejada: acabamentos superficiais, porosidades, entre outros (TOFAIL *et al.*, 2018).

A conversão de arquivos é uma etapa importante do processo para manufatura aditiva, sendo o mais comum o formato STL, que é limitado em converter superfícies em malhas triangulares. Em 2016, um novo formato foi desenvolvido para melhorar os resultados obtidos com a fidelidade entre a geometria gerada pelo software de CAD e as máquinas. Chamado de AMF (*Additive Manufacturing File*), trazendo recursos específicos para manufatura aditiva. Porém este tipo de arquivo não está sendo difundido e nem compatível com os fatiadores do mercado e seu suporte praticamente não existe em softwares de manipulação e edição 3D (ZEGARD e PAULINO, 2016).

2.2 UTILIZAÇÃO DE COMPONENTES MECÂNICOS FABRICADOS POR MANUFATURA ADITIVA METÁLICA

Os sistemas de manufatura aditiva metálica vem evoluindo durante os anos sob uma perspectiva não só de projetos especiais e prototipagem, mas também como possível solução para uma produção de peças em escala. Sistemas reguladores como a Sociedade Americana de Testes e Materiais vem procurando normatizar as técnicas desse processo, foi criado o Comitê de Tecnologia de Manufatura Aditiva, que orienta, segundo às normas ASTM, roteiros para o desenvolvimento de padrões internacionais, tanto para os materiais quanto para o processo (FRAZIER, 2014).

No segmento de implantes ortopédicos permanentes, como quadril e joelho, parafusos ou partes da calota craniana, a tecnologia de manufatura

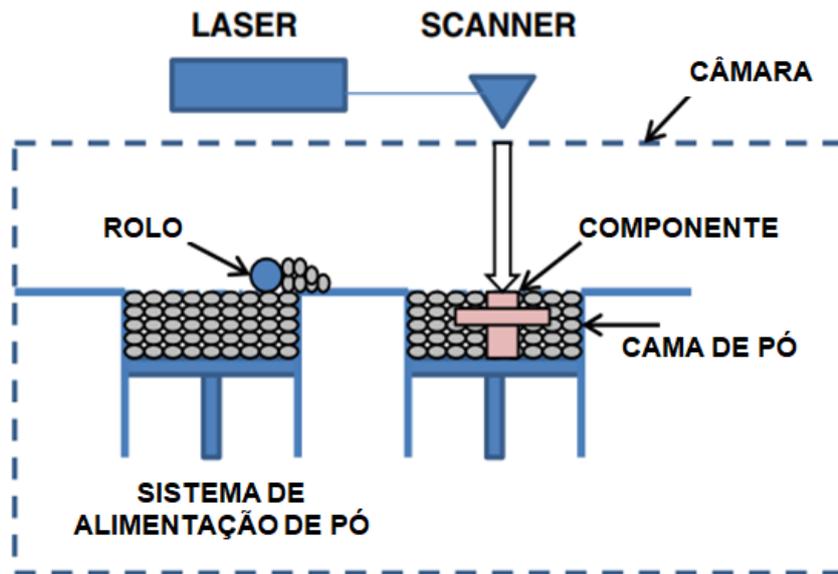
aditiva metálica tem sido muito empregada devido à facilidade de se gerar geometrias complexas, com porosidades projetadas para que haja a ancoragem entre o osso e o componente metálico, ajustado a cada paciente em um tempo muito curto. A personalização para cada paciente se baseia em dados obtidos por processos de digitalização e imagens médicas como radiografias ou ressonância magnética, com a vantagem de possibilitar a construção de peças ocas, no sentido de associar resistência mecânica com uma expressiva redução de peso (SING *et al.* 2016).

A inserção de novos materiais para processos de Manufatura Aditiva Metálica é uma meta a ser batida pelos institutos de pesquisa e que se faz importante devido a larga gama de possibilidades que podem ainda estar sendo explorada e desenvolvida. Hoje já é possível trabalhar, além dos aços ferramenta e aços inoxidáveis, com titânio puro e ligado, ligas de fundição de alumínio, superligas com base em níquel, ligas de cromo-cobalto, prata e ouro. Os maiores desafios, e que permanecem em pesquisa, são problemas com contaminação, controles químicos durante a fusão e as trincas geradas pela solidificação. Muitas empresas hoje buscam os processos de Manufatura Aditiva Metálica como uma solução para construção de peças complexas, peças em que se pode ajustar as propriedades mecânicas, sem a necessidade de pós-processamento e até mesmo já se imagina produções de componentes em escala, que possa associar o custo e o baixo investimento em ferramentas para a fabricação das mesmas (SEIFI *et al.*, 2016).

Os sistemas de manufatura aditiva metálica são classificados conforme o sistema de alimentação de material, fonte de energia e o volume de impressão. Podem ser divididos em três categorias (FRAZIER, 2014):

- Sistema de cama de pó: o leito de pó é espalhado pela área de trabalho e um feixe laser, ou feixe de elétrons, é utilizado para sinterizar ou fundir o pó na forma desejada. O pó que não foi fundido é varrido e o material processado forma um objeto tridimensional sólido (Figura 2).

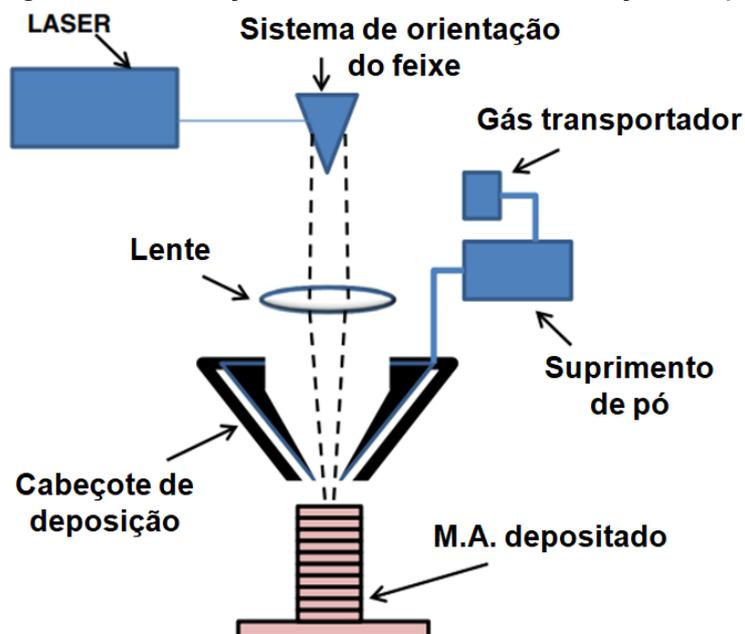
Figura 2 - Ilustração do sistema de cama de pó



Fonte: Adaptado de FRAZIER (2014)

- Sistema de alimentação de pó: nesse sistema o pó é transportado por um bocal até a superfície e a fusão ocorre por um laser que derrete o pó por camada, definindo a forma desejada. O processo é repetido camada por camada até formar o objeto sólido tridimensional (Figura 3).

Figura 3 - Ilustração do sistema de alimentação de pó

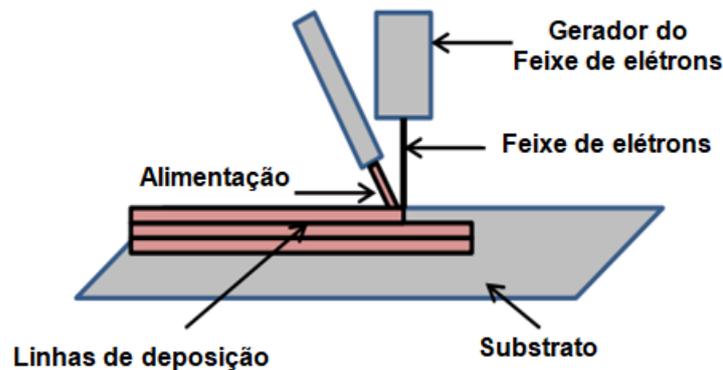


Fonte: Adaptado de FRAZIER (2014)

- Sistema de alimentação por fio: se diferencia dos anteriores no material a ser depositado, onde um arame é depositado camada por camada e a fonte de energia para a fusão pode incluir feixe de elétrons,

feixe de laser ou arco de plasma. Este sistema é adequado para grandes volumes de construção e tem uma alta taxa de deposição, porém necessita de processos de acabamento subsequentes com maior frequência que os anteriores (Figura 4).

Figura 4 - Ilustração do sistema de alimentação por fio



Fonte: Adaptado de FRAZIER (2014)

Tanto no processo de Fusão Seletiva a Laser (SLM) quanto no processo de Fusão por Feixe de Elétrons (EBM) a exclusão dos ligantes durante o processo permite que sejam construídas peças com níveis de densidade excelente, quase total (SING *et al.* 2016).

Ligas para Manufatura aditiva metálica passam por transformações térmicas complexas, que envolve extração de calor direcional, fusão repetida e solidificação rápida. Esses eventos ocasionam comportamentos do material não encontrada nos processos convencionais (FRAZIER, 2014).

As propriedades mecânicas estáticas de componentes produzidos por Manufatura Aditiva Metálica são similares aos produzidos por processos convencionais e as altas taxas de resfriamento favorece a formação de grãos reduzidos. A propriedade microestrutural e mecânica é anisotrópica, sendo que o eixo Z o sentido mais fraco. As microporosidades e defeitos superficiais interferem na vida em fadiga do material, porém acabamentos superficiais e usinagem posterior garantem uma vida em fadiga similar se comparado com as ligas forjadas (FRAZIER, 2014).

Segundo Sing *et al.* (2016), o resfriamento rápido de SLM proporciona uma microestrutura refinada, caracterizada por uma formação de estrutura dendrítica fina que traz resultados como o aumento da resistência à tração e consequente redução da ductilidade para o aço inoxidável 316L, material de uso comum na fabricação de biocompatíveis.

Kedziora *et al.* (2022), descreve uma diferença muito significativa nas propriedades mecânicas do processo de impressão do aço inoxidável 316 L se comparado aos processos FDM, em que o SLM apresentou propriedades mecânicas similares ao do aço forjado e recomenda a aplicação de um tratamento térmico para uma melhora substancial na resistência à fadiga. Segundo o autor, o processo FDM apresentou uma queda na resistência a tração de 41% no corpo de prova tratado termicamente e de 45% em corpos de prova não tratado.

Em relação à deformação, o processo EBM tem ligeira vantagem em relação ao processo SLM, devido a trabalhar com temperaturas mais altas e, em função disso, proporciona nas camadas um recozimento ou alívio de tensões residuais. Como o SLM trabalha com temperaturas mais baixas, proporciona um alto nível de tensões residuais. Isso reflete na densidade dos suportes na construção do objeto sólido tridimensional, com vantagem no processo EBM em comparação ao SLM (KÖRNER, 2016).

Instabilidade no processo é um fator determinante para a evolução do processo de Manufatura Aditiva Metálica para a fabricação de componentes personalizados ou até mesmo em série. A variação das máquinas e dos materiais normalmente trazem instabilidade e inconsistência na microestrutura do componente fabricado, apresentam defeitos, variabilidade e prejuízo em desempenho em propriedades mecânicas. Um esforço grande em pesquisa vem sendo planejado para que seja possível uma melhora no controle da poça de fusão, muito em função da alta velocidade de processamento. Esse controle da poça de fusão é imprescindível para entender a distribuição do calor entre as camadas depositadas e permitiria ajustar o processo para que os fatores como impurezas ou ligações químicas indesejadas minimizem seu efeito durante o processo (SEIFI *et al.*, 2016).

2.3 CARACTERÍSTICAS DO AÇO 17 4PH E APLICAÇÕES NA MANUFATURA ADITIVA

Yasa e Kruth (2011) ao estudarem os efeitos dos parâmetros do processo SLM sobre densidade e microestrutura, relatam que embora este processo seja capaz de produzir peças com densidade de 98-99%, a porosidade restante de até 1-2%, tornariam as peças “como construídas” não tão adequadas para aplicações de alta resistência e suporte de carga na industrial aeroespacial e indústria de defesa.

Yadollahi *et al.* (2016) relataram o efeito da orientação de construção da peça nas propriedades de tração e fadiga das amostras de 17-4PH, respectivamente. Além disso, eles também relataram que diferentes orientações de construção e aquecimento durante o tratamento térmico produzem diferentes fases microestruturais de peças de 17-4PH fabricadas e é responsável por diferentes propriedades mecânicas.

Irrinki *et al.* (2016) descobriram que os parâmetros do pó, como tamanho e forma das partículas durante o processo de atomização em pó, afetam a densidade e as propriedades mecânicas do SLM, sendo que a aplicação de pó atomizado a gás melhorou a densidade e propriedades mecânicas das peças 17-4PH SLM quando comparadas às peças feitas usando pó 17-4PH atomizado com água.

Qiu *et al.* (2015) indicou que o calor fornecido entre as faixas de cada camada de impressão, resulta na eliminação de porosidades aprisionadas em gás e partículas formadas entre as faixas.

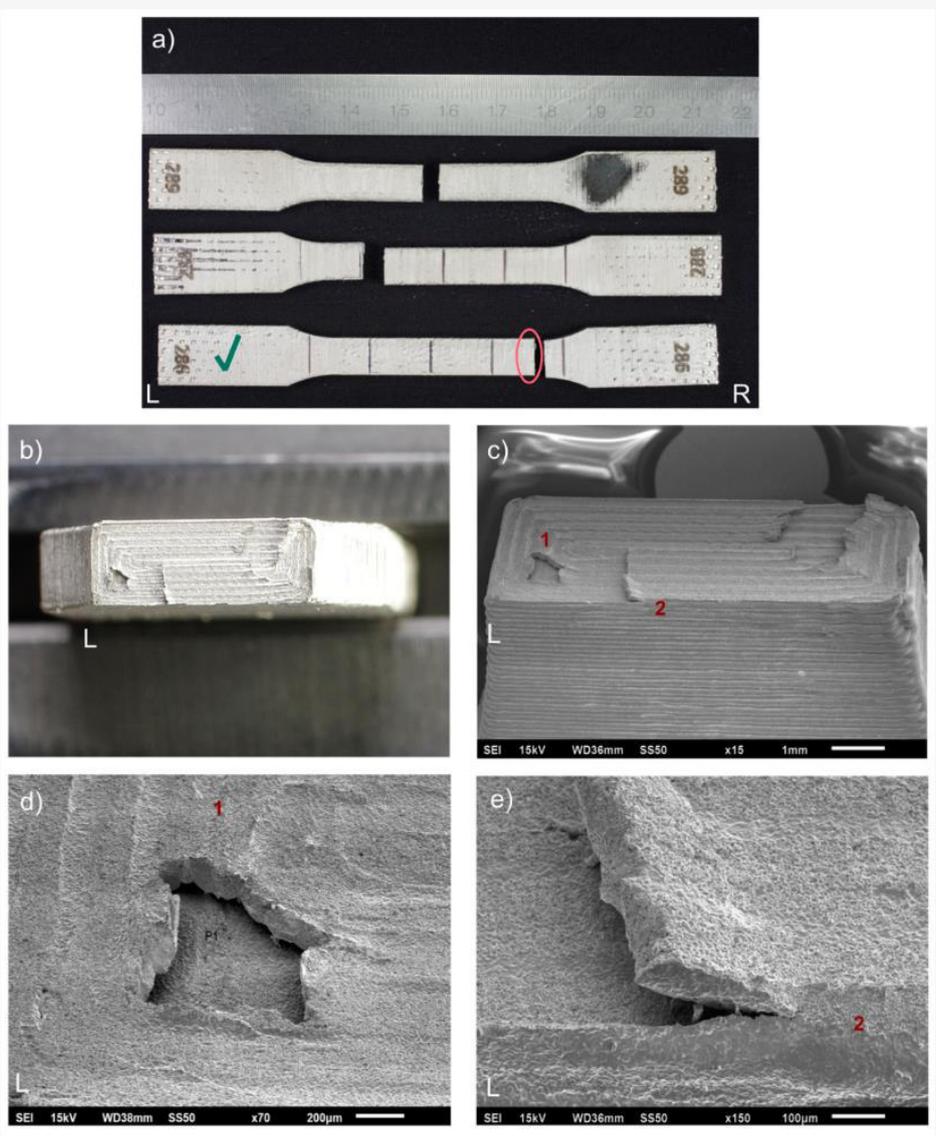
Em recente estudo, Hu *et al.* (2017) observaram, que amostras tratadas termicamente envelhecidas, aumentaram a dureza em comparação com as amostras impressas usando ambas as estratégias de digitalização.

Kedziora *et al.* (2022) publicou em seu artigo resultados alarmantes para o aço inoxidável 17-4 PH impresso no processo FDM. Segundo o estudo, defeitos internos causados pelos vazios entre as camadas torna o material

quebradiço (baixa resistência estática e à fadiga). No ensaio de tração foi caracterizada pela delaminação entre as camadas impressas, ocorrido em todos os corpos de prova testados, ilustrados na Figura 5.

Figura 5 - Resultado do teste de tração (orientação em plano ZX)

Figura 7. Fraturas de corpos de prova de tração 17-4 PH apresentados como: **(a)** corpos de prova fraturados; **(b)** Superfície de fratura, lado esquerdo (imagem de microscópio óptico), amostra 286; **(c)** superfície de fratura, lado esquerdo (imagem MEV), espécime 286; **(d)** **Delaminação** local de uma camada impressa na fratura, característica 1 (imagem MEV), espécime 286; **(e)** **Delaminação** local da camada impressa, característica 2 (imagem MEV), espécime 286. As amostras foram numeradas, que são visíveis na figura. As letras L e R representam os lados esquerdo e direito da amostra na figura. Uma marca de seleção verde significa o espécime cujas faces de fratura foram mostradas.



Fonte: Adaptado de KEDZIORA et al. (2022)

Conforme Rashid *et al.* (2017), foi feito um estudo para peças impressas por fusão seletiva a laser, em que foram investigados os efeitos de duas estratégias de varreduras diferentes em amostras de aço inoxidável 17-4PH, nas condições como fabricadas e tratadas termicamente, foram caracterizadas em termos de densidade relativa, composição da fase microestrutural e microdureza. Uma das estratégias (Scan “O”), consistiu em varredura única de cada camada de impressão e a outra estratégia (Scan “X”), consistiu em escanear cada camada de impressão duas vezes. A varredura das amostras de ambas estratégias foram comparadas com o CAD – modelo para analisar a precisão dimensional das amostras as-built. Neste estudo, observou-se que (i) as amostras fabricadas utilizando a estratégia de varredura dupla mostrou dureza maior do que as amostras impressas usando varredura única, devido ao fato de que escanear cada camada duas vezes resulta em maior porcentagem de martensita. (ii) o tratamento térmico das amostras fabricadas produziram distribuição uniforme da fase dominante de martensita temperada com austenita retida insignificante e resultou em dureza melhorada. (iii) as amostras impressas com estratégia de varredura dupla, mostrou melhora na densidade relativa em comparação com a impressa com estratégia de varredura única.

2.4 APLICAÇÕES DO METAL INJECTION MOULDING NA INDÚSTRIA

O processo de Moldagem de metal por injeção (MIM) é uma alternativa para as atividades industriais, nas áreas de automobilística, aviação, eletrônicos, entre outros, pela facilidade de produzir componentes complexos, que precisam de várias etapas no processo de fabricação e altos custos de produção, ou até mesmo simplificar montagens complexas em um único componente. A gama de materiais que podem ser utilizados no processo é ampla e tem vantagens sobre os processos de metalurgia do pó ou peças fundidas (SUBASI, 2020).

A utilização do MIM para processamento do aço inoxidável 17-4 PH permite a produção em escala de peças complexas em um tempo muito curto e pode ajudar e sanar dificuldades no processamento, sendo que o tratamento

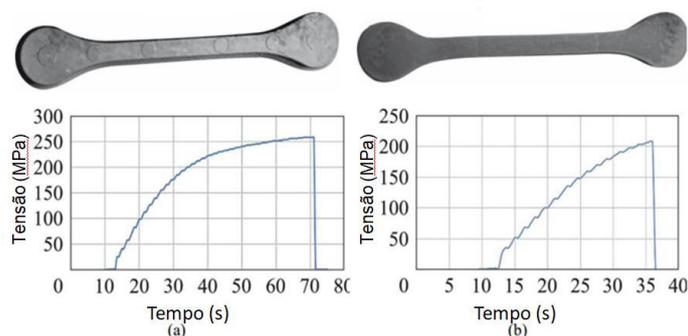
térmico de grande impacto na microestrutura e melhora as propriedades mecânicas do aço (CHUNG e TZENG, 2019).

Dentre os inovadores processos de fabricação de peças em metal através da manufatura aditiva, em sintonia com os recursos oferecidos pelo processo MIM, existem dois métodos bastante discutidos e estudados entre os pesquisadores. Um processo que utiliza um filamento formado por uma blenda de pós metálicos com aglutinante polimérico de polioximetileno e outro processo chamado Binder Jet, onde o pó de aço é depositado por camadas e o aglutinante é colocado posteriormente para formação do objeto sólido tridimensional (KOROTCHENKO *et al.*, 2020).

Existem boas razões para uma boa integração do processo MIM com o processo de Manufatura Aditiva Metálica por extrusão ou Binder Jet. A principal delas é a possibilidade de fabricação de peças unitárias ou personalizadas, em que o investimento no desenvolvimento de ferramentas é nulo e a liberdade de trabalhar com a geometria sem restrições de extração é totalmente possível. No caso do processo Binder Jet, o sistema permite, além de uma melhor rugosidade na superfície, em torno de duas vezes menor, uma maior agilidade na impressão, o que permite até a produção de pequenos lotes em um tempo relativamente curto, peças com uma tolerância menor que a extrusão de filamento, porém um custo operacional maior. Em relação às propriedades mecânicas e físicas do material, a tecnologia Binder Jet apresenta uma maior densidade, dureza na superfície e resistência à tração, se comparado ao outro processo por extrusão (KOROTCHENKO *et al.*, 2020).

Segundo Korotchenko *et al.* (2020), um bom resultado para impressão 3D de pós metálicos depende muito dos parâmetros de impressão e da forma com que foi construída na mesa de impressão. A temperatura de extrusão, a taxa de alimentação do filamento, a velocidade de impressão, fatores de sobreposição de camadas, a forma com que a peça é dividida no fatiamento e a orientação das camadas pode apresentar resultados significativos no aumento da resistência. Um estudo em relação à resistência a tração foi feito, comparando o processo MIM com o processo de Manufatura Aditiva Metálica por Extrusão e apresentou comportamento conforme a Figura 6.

Figura 6 - Resultado do teste de tração



(a) máquina de moldagem por injeção, resistência à tração 251 MPa;
 (b) impressão 3D, resistência à tração de 207 MPa

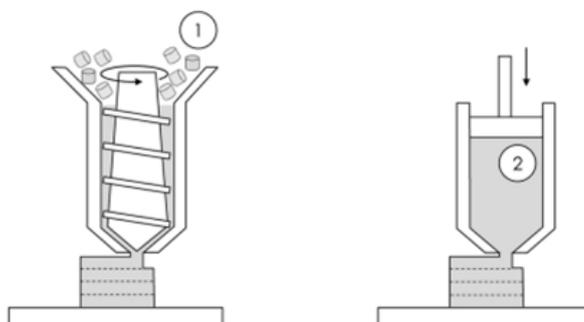
Fonte: Adaptado de KOROTCHENKO *et al.* (2020)

Conforme Waalkes *et al.* (2020), três processos distintos para trabalhar com tecnologia de Manufatura Aditiva Metálica por extrusão podem ser citados:

- No sistema baseado em filamento o material não fundido é empurrado por um sistema mecânico em direção a um bico extrusor aquecido, que por sua vez empurra o material fundido através dele. Esse sistema é considerado o processo de menor investimento e pode ser utilizado por impressoras de polímeros já presentes no mercado. Um dos principais requisitos para este processo é ajustar a flexibilidade de um composto de pó metálico, variando o percentual de aglutinante, até atingir a flexibilidade desejada.
- No sistema baseado em grãos e extrusão por parafuso, o material granulado é transportado até o bico por meio de parafuso, que derrete durante o transporte e submetido a uma alta pressão para que seja extrusado. Neste sistema o grão pode ser utilizado sem a necessidade de aglutinante para correção da flexibilidade. Nesse processo é possível maiores taxas de deposição de material, o que permite a fabricação de peças de maior volume, porém, além do custo das máquinas serem de 8 a 10 vezes maior, o ar preso dentro do sistema durante o processo de plastificação é um desafio para correção de imperfeições e defeitos metalúrgicos.
- Por fim, no sistema baseado em grãos e extrusão por pistão, o material é colocado dentro de um cilindro, é aquecido até a plastificação do

polímero condutor e a pressão para que ocorra a extrusão é feita por gás ou um pistão em movimento. Em comparação com o processo por parafuso, a vantagem é que os mecanismos de extrusão são bem mais simples e acessíveis em função da baixa complexidade. Em relação ao processo por filamento, a correção do aglutinante deixa o processo por filamento com mais etapas de remoção do ligante e mais ajustes na sinterização, o que é uma desvantagem, visto que no processo por pistão, pode-se trabalhar com o material padrão de mercado (Figura 7).

Figura 7 - Desenho esquemático para o sistema baseado por parafuso e pistão



- (1) Processo baseado em extrusão por parafuso
- (2) Processo baseado em extrusão por pistão

Fonte: WAALKES *et al.* (2020)

2.5 MELHORIA DA EFICIÊNCIA DOS MOLDES DE INJEÇÃO

Molde para injeção de polímeros são ativos de alto valor para as empresas, e a escolha dos materiais adequados para a fabricação e acabamento superficial são tarefas cruciais para um bom rendimento, uma vida útil longa e um baixo custo com reposição de componentes e manutenções corretivas. Para uma escolha adequada de materiais, é preciso avaliar o tipo de material a ser injetado, mais ou menos abrasivo, com a presença ou não de fibras ou aditivos, temperaturas e pressões do processo de injeção. Esses materiais abrasivos podem gerar desgastes em determinadas regiões do molde e ou gases corrosivos, como a polivinila (PVC) e a poliamida (PA), devido ao superaquecimento do polímero, para as superfícies do molde, ocasionar

defeitos superficiais e até troca prematura de componentes (ZABALA *et al.*, 2019).

Segundo Marin *et al.* (2021), o sistema de refrigeração bem dimensionado pode, além de corrigir questões de preenchimento e defeitos nas peças injetadas, ter uma expressiva redução da variação dimensional da peça injetada, redução no tempo de ciclo e aumento da produtividade expressiva, visto que dois terços do tempo total de ciclo, em média, se consome com o resfriamento.

A rugosidade nas superfícies do molde é um fator determinante para o sucesso da operação de injeção e tem influência significativa tanto no acabamento da peça, quanto nos requisitos de processo como o tempo de injeção, a pressão e velocidade da injeção e a força necessária para que a máquina consiga extrair a peça de dentro das cavidades. Um maior atrito requer mais força para expulsar a peça da cavidade e a possibilidade de marcas na peça é diretamente proporcional à dificuldade de extração, por isso, o controle é fundamental para que o molde possa gerar o melhor resultado e trazer competitividade ao negócio (ZABALA *et al.*, 2019).

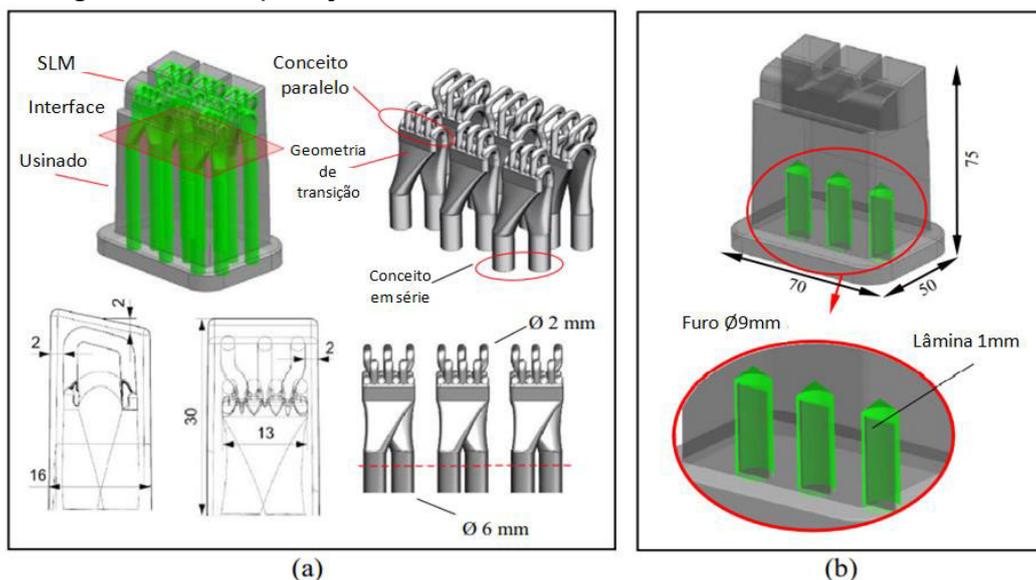
Segundo Zabala *et al.* (2019), em experimento prático, materiais com maior teor de fibra tem seu coeficiente de atrito reduzido, compensado pelo desgaste abrasivo. A fibra reduz o percentual de polímero em contato as paredes do molde e possibilita menor adesão do polímero. Para redução do desgaste abrasivo, é recomendada a utilização de materiais com maiores durezas. Tratamentos superficiais como TiN e Nitretação Iônica apresentaram bons resultados em relação ao desgaste, atribuído a dureza que esses acabamentos atingem na superfície.

De acordo com Zabala *et al.* (2019), a pressão de injeção, a velocidade e o ângulo de impacto são fatores críticos na perda de material do molde por desgaste. Um outro fator de destaque foi o desgaste erosivo, no caso da poliamida reforçada com fibra de vidro, muito mais erosivo do que os materiais plásticos, sendo como na abrasão, os acabamentos superficiais com

expressiva melhora na condição de redução do desgaste, sendo o TiN e a Nitretação Iônica os acabamentos que apresentaram melhores resultados.

Relacionando produtividade, ganho em estabilidade do processo de injeção, ganhos de qualidade e vida útil dos moldes e o equilíbrio térmico, as práticas associando a manufatura aditiva com processos convencionais de usinagem de cavidades tem tido avanços muito positivos. Os processos de furação, ou circuitos utilizando canais construídos por máquinas convencionais têm sido utilizados até hoje e são eficientes, porém limitados. Nos casos de geometrias mais complexas, não permitem uma estabilidade térmica em toda a região que precisa ser refrigerada, por impossibilidade de acesso. A combinação entre a manufatura aditiva proporciona, baseado em simulação, dimensionar canais não geométricos que se conformam de acordo com o perfil das superfícies que precisam ser refrigeradas, melhorando a qualidade das peças e reduzindo o tempo de resfriamento em uma proporção muito vantajosa, no ponto de vista de economia e consequente retorno financeiro. A Figura 8 ilustra a diferença entre os dois processos. Esta vantagem ainda está pouco acessível em função do custo de investimento na tecnologia SLM, a qual já possui avanços e está em crescente estudo de aplicação (MARIN *et al.*, 2021).

Figura 8 - Comparação entre insertos com e sem interface com SLM

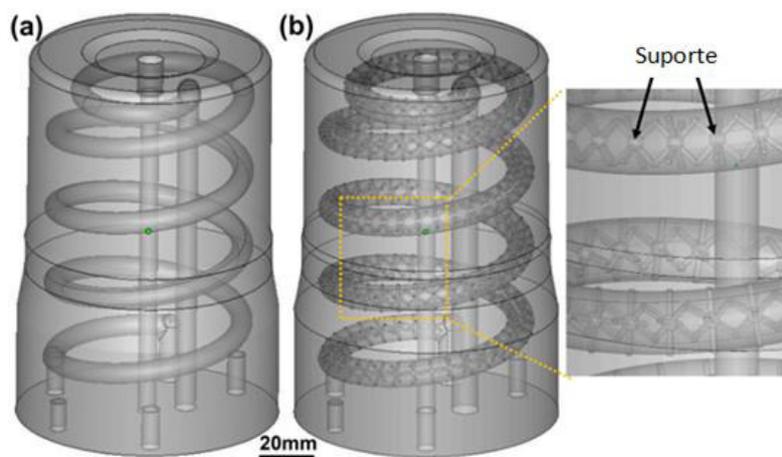


- (a) Componente com interface SLM + convencional
 (b) Componente com processo convencional

Fonte: Adaptado de MARIN *et al.* (2021)

Segundo Tan *et al.* (2020), uma proposta foi estudada para a avaliação de melhorias no processo de refrigeração de insertos ou cavidades de moldes de injeção (Figura 9). Neste estudo ficou evidente que, com a aplicação de simulação e manufatura aditiva metálica (SLM no estudo), baseado em simulação, também foi possível obter bons resultados, como citado anteriormente, em menor deformação, maior precisão dimensional e um expressivo ganho de rendimento do molde, porém comparando diâmetros para passagem livre do fluido e com suporte interno do furo, mantendo o mesmo fluxo de fluido.

Figura 9 - Comparação entre fluxo com passagem livre e suporte interno



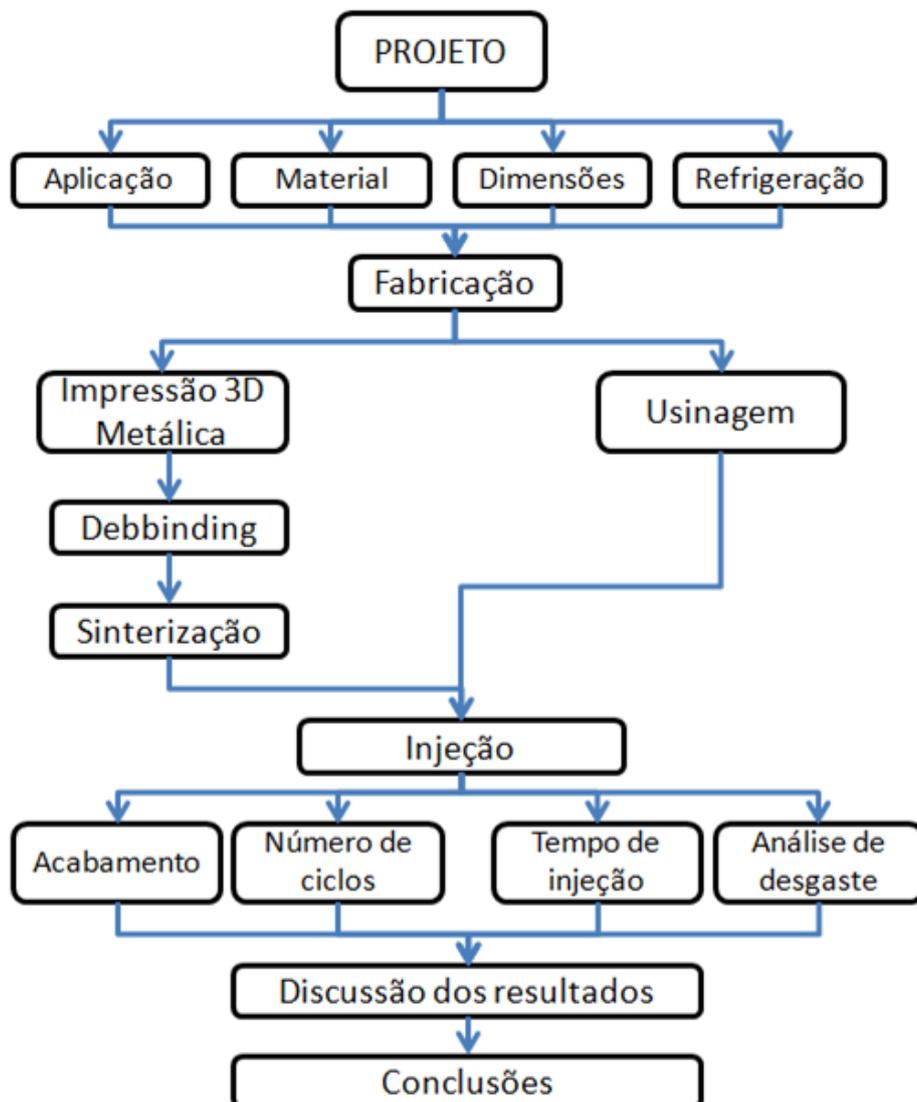
Fonte: Adaptado de TAN *et al.* (2020)

Em um fluxo turbulento, o refrigerante está constantemente se misturando, fazendo com que o gradiente de temperatura se mantenha baixo e menor será a resistência à transferência de calor resultante e um maior coeficiente de transferência de calor por convecção (TAN *et al.*, 2020).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo foi realizado em duas etapas, sendo uma etapa para a fabricação do componente tridimensional do molde pelo processo convencional de usinagem e uma segunda etapa reproduzindo o mesmo componente utilizando a tecnologia de manufatura aditiva por extrusão, seguindo de debinding e sinterização. A Figura 10 apresenta um fluxograma demonstrando as etapas que serão detalhadas na metodologia.

Figura 10 - Fluxograma metodológico



Fonte: Próprio autor

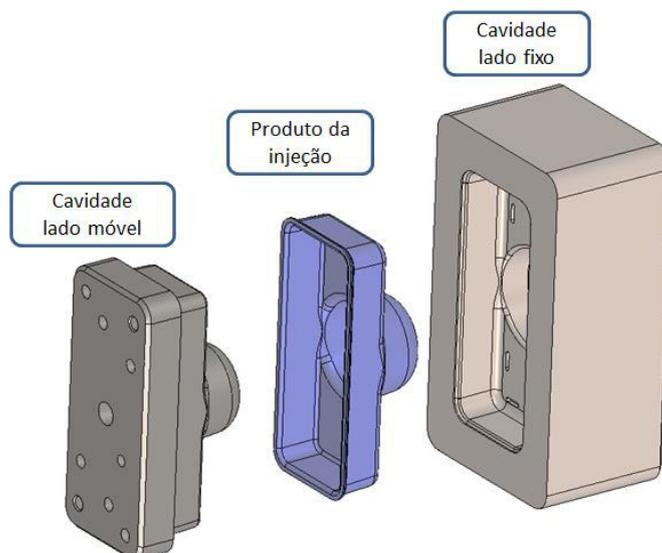
3.1 PROJETO DO MOLDE

O componente foi projetado em um modelo matemático, através de um software de CAD, estruturado com formas geométricas bem definidas, distintas e de fácil avaliação, permitindo ser medido por processos de medição tradicionais como paquímetro, micrômetro ou até mesmo em um processo de medição tridimensional, dimensões como diâmetros externos, internos, larguras, comprimentos e profundidades, as quais são alvos frequentes em muitos projetos na indústria da injeção plástica. Desvios de forma também podem ser observados como planicidade, concentricidade, simetria, entre outros. Dessa forma, conhecer esses desvios, mensurar e perceber a influência deles em processos de manufatura aditiva e sinterização é crucial para o avanço de projetos futuros, visto os métodos de fabricação disruptivos de geometrias complexas, antes não consideradas por processos de fabricação convencionais.

3.1.1 Aplicação

A aplicação da peça é apenas para fins de conhecimento sobre o processo e permitiu verificar as limitações, vantagens, desvantagens, facilidades e dificuldades de se fabricar componentes que possam fazer parte na construção de um molde para injeção polimérica, até então fabricados em processos de manufatura subtrativa e até mesmo manufatura aditiva por processos de fusão seletiva a laser, sinterização direta de material a laser e fusão por feixe de elétrons. Nesta aplicação, o componente do molde é submetido constantemente ao contato com a massa fundida do polímero vindo do canhão da injetora e seu núcleo circulando um fluido refrigerante para manter uma temperatura dentro de um limite onde seja possível o resfriamento da massa fundida, minimizando a deformação e otimizando o tempo de extração do componente injetado.

Figura 11 - Componentes fabricados por manufatura aditiva



Fonte: Próprio autor

No processo estudado, os componentes impressos (cavidade lado fixo e cavidade lado móvel), Figura 11, foram obtidos pelo processo de extrusão de material (pó metálico + polímero ligante), visto a facilidade de acesso aos equipamentos de manufatura aditiva por extrusão de material, a tecnologia empregada para obtenção de um filamento que permite boas propriedades, tanto na deposição quanto nos processos posteriores de extração do ligante e sinterização e possibilidade de ajuste e calibração do componente, após a sinterização, por processos de usinagem.

3.1.2 Material

O material utilizado para fabricação dos componentes impressos foi um filamento da fabricante BASF, conhecido como Ultrafuse 17 4PH, Figura 12, cuja composição é um compósito onde 90% é pó sinterizável de aço inox 17 4PH e 10% é polímero aglutinante. As características e propriedades mecânicas do material estão detalhadas no ANEXO I. O pó de aço tem origem também conhecida como V630, um aço inoxidável, endurecido por precipitação de cobre, magnético, tratável termicamente, características que possibilitam

manter sua resistência mecânica e à corrosão até 315°C. Segundo o fabricante o filamento apresenta as características abaixo:

- Facilidade na impressão 3D metálica
- Alta resistência mecânica e dureza
- Boa resistência à corrosão
- Ampla gama de processamento para as peças verdes
- Totalmente endurecido permite maior resistência mecânica

Figura 12 - Material Ultrafuse 17 4-PH BASF



Fonte: Adaptado da BASF

A escolha do filamento aplicado a este estudo foi determinada ponderando principalmente em características de resistência mecânica e resistência à corrosão em temperaturas elevadas. Segundo o estudo de Tosto *et al.* (2021), as ligações entre as camadas da peça impressa pelo processo FDM, orientação das camadas e os corretos parâmetros de impressão tem influência direta nos resultados relacionados à resistência mecânica, devido a presença de micro porosidades entre as camadas. Esses vazios trazem restrições que não permite atingir propriedades similares ao processo de injeção de pós metálicos e, apesar de ser um processo extremamente mais barato, também é inferior às propriedades mecânicas se comparados à processos de impressão por SLM.

Essas demandas são desafios constantes impostos pelo mercado em trabalhar com ligas de aço que suportem condições de temperaturas elevadas, sob pressão, exercidas pela pressão de injeção e pressão de fechamento, arraste do material polimérico, superaquecimento da massa fundida, que pode ocasionar a liberação de gases e danificam as paredes da cavidade do molde por meio de gases como HCl (ácido clorídrico) no caso do PVC, NH₃ no caso da Poliamida e alguns aditivos como retardante de chamas que contém halogênios como fósforo (F), cloro (Cl) e bromo (Br) (ZABALA *et al.*, 2019)

Devido à similaridade ao processo Metal Injection Molding, devido ao aglutinante, removido por um processo catalítico e ao próprio processo de sinterização, foi necessário considerar no projeto um fator de contração no modelo, para que o componente se aproxime das dimensões desejadas após todo o processo de fabricação. O fabricante define os parâmetros conforme a Tabela 1.

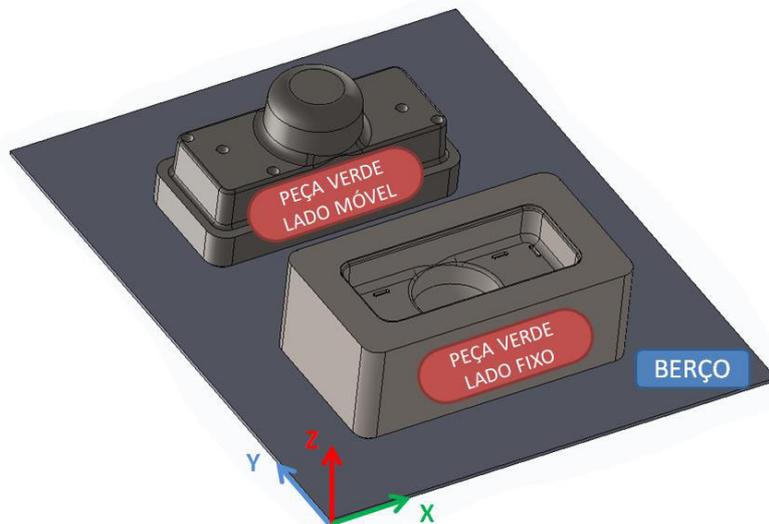
Tabela 1 - Contração por eixo do filamento Ultrafuse 17 4PH

	Ultrafuse 17 4PH
Contração eixo X	16,50%
Contração eixo Y	16,50%
Contração eixo Z	20,70%

Fonte: Adaptado da BASF

De acordo com as informações fornecidas pelo guia técnico do material, os percentuais de contração e os respectivos eixos são definidos de acordo com a complexidade da impressão, diferente em cada novo projeto com constantes desafios no preenchimento correto das camadas, formação de detalhes específicos, entre outros requisitos, mas principalmente estruturado de acordo com a posição do componente no berço onde é submetido aos processos de debinding e sinterização. A posição dos componentes impressos é ilustrado na Figura 13.

Figura 13 - Relação impressão x sinterização



Fonte: Próprio autor

Para o material do componente usinado foi utilizado um bloco de aço inoxidável V630, que foi submetido ao processo convencional de manufatura subtrativa, usinagem em um centro de usinagem de 3 eixos, com as devidas características a que se limita o equipamento e o processo.

3.1.3 Dimensões

As dimensões dos componentes foram definidas de acordo com as especificações de um porta molde já fabricado e de dimensões conhecidas, alojado no porta moldes, sendo o alojamento ajustado com tolerâncias definidas para o processo em operação existente. Desta forma, tendo dois conjuntos de postigos, um impresso e outro usinado, de mesma forma geométrica e mesma posição no molde, os dados foram comparados e tiveram exatamente os mesmos parâmetros de processo.

3.1.4 Refrigeração

A refrigeração foi proposta de duas formas distintas, ilustrada na Figura 14, de acordo com as possibilidades possíveis em cada tecnologia, sendo, no

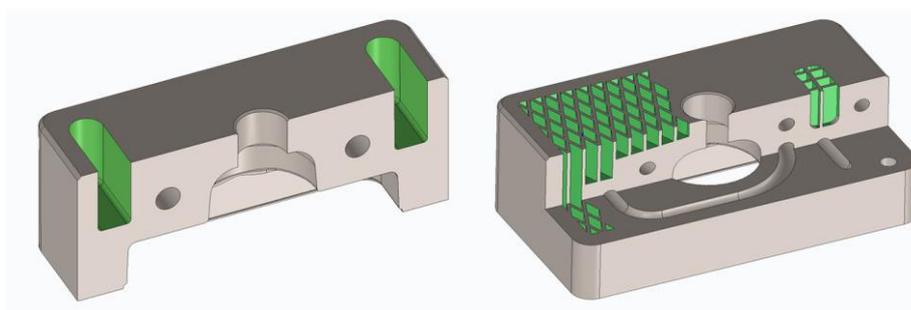
componente usinado, furos de refrigeração usinados com brocas padrão de mercado e no componente fabricado por manufatura aditiva, geometrias tridimensionais em conjunto com furações que se ajustarão à geometria que vai formar a cavidade.

Conforme estudo descrito por Marin *et al.* (2021), canais de refrigeração dimensionados para fabricação em geometrias 3D resultaram em uma redução, em comparação com os canais convencionais, no tempo de resfriamento em até 60%, redução no empenamento das peças injetadas e uma diferença de 10 vezes na diferença de temperatura ao longo do inserto testado. Isso ocorreu em consequência de uma melhor distribuição dos canais, o que permitiu uma troca térmica mais eficiente, resultando em um equilíbrio térmico do componente testado e melhores resultados no resfriamento do componente injetado (Figura 14).

Figura 14 - Fontes dissipadoras de calor inserto lado fixo

Usinagem convencional

Impressão 3D metálica



Fonte: Próprio autor

3.2 FABRICAÇÃO

Na fase da fabricação do componente, houveram duas atividades que evoluíram em paralelo, sendo o processo de manufatura aditiva por extrusão (seguido de debinding e sinterização) e o processo de usinagem convencional.

3.2.1 Impressão 3D Metálica

O componente, Figura 15, foi fabricado por uma impressora FDM da marca Sethi 3D, modelo S3, com os parâmetros definidos conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros para impressão

Parâmetros	Unidade	Valor
Temperatura do bico	°C	250
Temperatura da mesa de impressão	°C	100
Velocidade de impressão	mm/s	30
Altura da camada	µm	200
Diâmetro do bico	Mm	0,4
Número de contornos	n.a.	1
Sobreposição de camadas	%	35
Velocidade da primeira camada	mm/s	15
Altura da primeira camada	µm	150
Preenchimento	%	101
Tipo de preenchimento		Retilíneo
Refrigeração	n.a.	Sem

Fonte: Próprio autor

Figura 15 - Componente impresso por FDM



Fonte: Próprio autor

Um relatório dimensional dos dois componentes foi feito utilizando uma Tridimensional, com o objetivo de avaliar a precisão da impressora.

3.2.2 Debinding

Sing *et al.* (2021) cita dois processos para extração do ligante polietileno glicol (PEG), onde a peça foi submersa em água, para extração do ligante do material 17 4PH, agitadas magneticamente por 12 horas à temperatura ambiente e secas por 2 horas em um forno à temperatura de 100°C.

Para o processo de extração, como foi utilizado o material ULTRAFUSE da BASF, foi feito um debinding dos componentes do experimento (Figura 16), um processo catalítico, em um forno do fabricante CREMER. Para casos de peças construídas por impressão 3D, optou-se por 3 ciclos consecutivos de debinding, com o objetivo de melhorar a remoção do ligante com maior eficiência, sendo que resíduos poderiam permanecer nos vazios entre as camadas e na sobreposição das mesmas. Os parâmetros de processo seguem na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros do processo de debinding

Descrição	Valor	Unidade
Tempo ciclo	3,5	H
Temperatura	125	°C
Ácido nítrico	6,5	ml/min
Nitrogênio (vazão)	6,5	m ³ /h
Pureza Nitrogênio	99,995	%
Ácido nítrico	99,7	% min

Fonte: Próprio autor

Foi optado por 3 ciclos devido a diferenças na compactação do material extrusado, sendo que em peças injetadas no processo MIM existem pressões de injeção e recalque, que auxiliam na obtenção de uma peça com níveis de densidade próximas do considerado ideal ao processo, visando atingir densidades próximas do material laminado, utilizadas no processo MIM convencional.

Figura 16 - Componente após Debinding



Fonte: Próprio autor

3.2.3 Sinterização

O processo de sinterização foi realizado em um equipamento da marca CREMER, em atmosfera sob vácuo e os dados do processo seguem na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros do processo de sinterização

Descrição	Valor	Unidade
Tempo ciclo	3	H
Temperatura	1330	°C
Fluxo hidrogênio	6,5	m ³ /h
Tempo Temp. máxima	3	H
Ponto de orvalho	-40	°C
Campo eletromagnético	1500	mV

Fonte: Próprio autor

3.2.4 Usinagem

O componente usinado foi fabricado em uma máquina de usinagem de três eixos, da marca Maxmill QMC-850, partindo de um bloco em bruto e serrado. Outros processos como calibração de furos, faceamento para garantir paralelismo entre as faces e calibração de contornos, foram utilizados para

assegurar a montagem do conjunto no porta moldes, para os componentes impresso e usinado a partir de um bloco serrado.

3.3 INJEÇÃO

Os componentes fabricados pela manufatura aditiva por extrusão e usinado, foram montados no porta molde existente e foram avaliados as características conforme descrito abaixo.

3.3.1 Acabamento

Foi avaliado o acabamento da superfície da peça injetada, identificando defeitos superficiais possíveis e deformações geométricas causadas por falhas na impressão do componente ou do próprio processo de injeção.

3.3.2 Número de ciclos

Foi definido um número de ciclos e posteriormente avaliado efeitos como variação dimensional, empenamentos ou defeitos possivelmente causados por efeitos comuns na operação.

3.3.3 Tempo de injeção

Foram verificados e registrados os tempos de injeção para cada componente em operação, sendo trabalhado em cada caso individual, testando tempos de resfriamento diferentes e observar o comportamento, mantendo um padrão de acabamento permitido para o componente injetado.

3.4 ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração foi realizado na FURG SAP, com um equipamento da marca InterMetric, modelo GR161 e carga de 100kN, Figura 17.

Figura 17 - Equipamento utilizado para ensaio de tração



Fonte: Próprio autor

Após os procedimentos de calibração do equipamento, submetemos ao ensaio de tração, três corpos de prova, projetados de acordo com a norma ASTM E8-E8M, impressos no mesmo ciclo de impressão e sinterizados na mesma carga de sinterização, Figura 18.

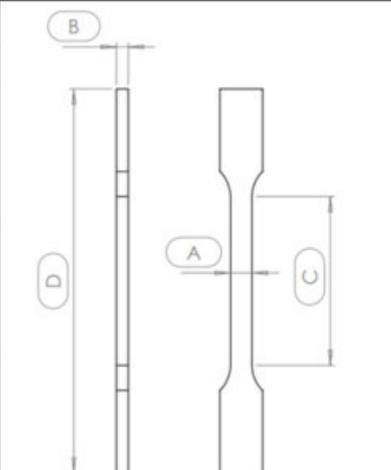
Figura 18 - Corpos de prova utilizados para o ensaio de tração



Fonte: Próprio autor

Afim de fornecer obter informações corretas geradas pelo software de suporte ao equipamento, foi necessário fornecer dados dimensionais referente aos corpo de provas ensaiado, conforme descrito na Tabela 5.

Tabela 5 - Dimensões do corpo de prova

ENSAIO DE TRAÇÃO - DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA					
	CP	DIMENSÕES (mm)			
	A	B	C	D	
1	5,1	2,7	40,7	91	
2	4,8	2,85	40,7	91	
3	5,2	2,67	40,7	90,65	

Fonte: Próprio autor

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo estão descritos e discutidos os resultados obtidos durante a execução das atividades propostas na metodologia.

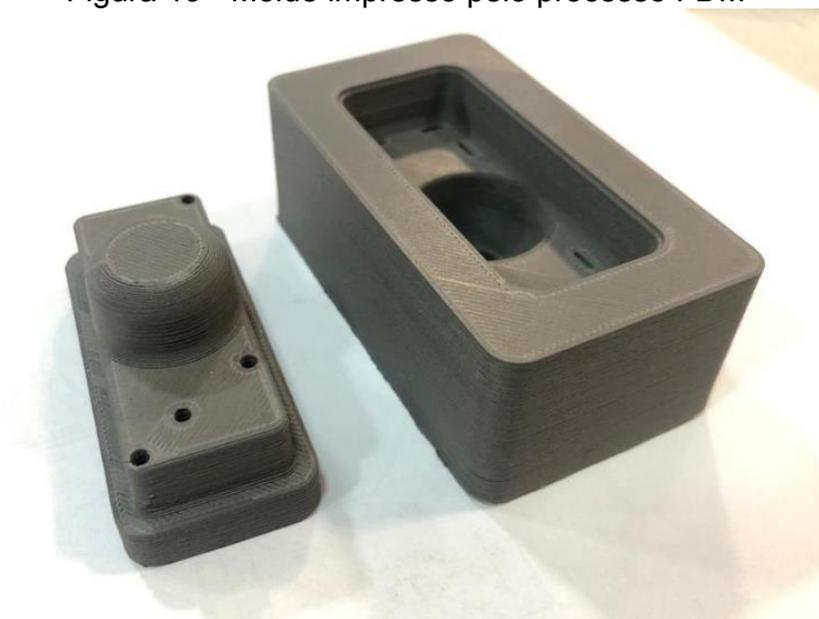
4.1 PROJETO DO MOLDE

O componente injetado foi projetado pensando em facilitar a obtenção de características tangíveis e intangíveis, possibilitando uma avaliação detalhada e utilizando ferramentas para um processo de medição convencional.

4.1.1 Aplicação

Na figura 19 pode ser visualizado o molde na condição impressa com as suas respectivas cavidades. O modelo impresso não apresentou imperfeições nas laterais e nas faces, as quais eventualmente podem ser visualizadas devido a falha na extrusão do material, problemas de sub extrusão ocasionadas por entupimento do bico de extrusão, variação nos movimentos dos eixos da impressora 3D utilizada ou variação na temperatura do bico, devido aos controles da impressora de um parâmetro máximo e mínimo de temperatura. Não houve descolamento de camadas, normalmente causada pela diferença da temperatura entre a base apoiada na mesa e última camada impressa.

Figura 19 - Molde impresso pelo processo FDM



Fonte: Próprio autor

4.1.2 Material

Fazendo uma comparação entre materiais e processos de sinterização, Singh *et al.* (2021) caracteriza o processo de impressão FDM muito próximo aos outros processos de impressão por SLM e EBM e características de resistência mecânica muito similares ao processo MIM, utilizando para a extrusão o próprio compósito utilizado na injeção (SS 17-4PH), plastificado em uma rosca adaptada a uma impressora 3D.

O material apresentou um comportamento de preenchimento constante, resultado de uma combinação correta de parâmetros de impressão, fornecidos no Datasheet do material da fabricante BASF Ultrafuse 17 4-PH. Não foram percebidos pontos de emenda entre camadas aparente, não houve falta de preenchimento nas camadas e não apresentou pontos de sobra de material, efeito do movimento de retração e aproximação do bico extrusor no deslocamento entre uma camada e outra.

Se por um lado tivemos uma boa aderência entre a mesa aquecida e a base da peça, devido a utilização de uma cola específica para materiais com

aço na composição, a Figura 20 mostra uma deformação de parte da primeira camada, causada pelo efeito da aderência da cola na mesa de impressão.

Figura 20 - Molde impresso pelo processo FDM



Fonte: Próprio autor

4.1.3 Dimensões

Foi criado um relatório dimensional com cotas de controle, para avaliar as variações dimensionais entre o modelo projetado no CAD e o componente impresso, ilustrado na tabela ANEXO II e ANEXO III.

4.2 FABRICAÇÃO

4.2.1 Impressão 3D metálica

De acordo com Singh *et al.*(2021) os parâmetros de otimização baseada em algoritmos para obter densidade máxima do corpo verde e rugosidade mínima da superfície foram aplicados ao processo de impressão e divergem

dos valores aplicados pelo fabricante do filamento. As diferenças estão correlacionadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Comparativo entre parâmetros de impressão FDM

	SINGH <i>et al.</i>	Experimento
Espessura de camada (mm)	0,05	0,2
Velocidade impressão (mm/s)	20	25
Fluxo da extrusora (%)	120	101
Temperatura da extrusora (°C)	196	250
Temperatura da mesa (°C)	60	105

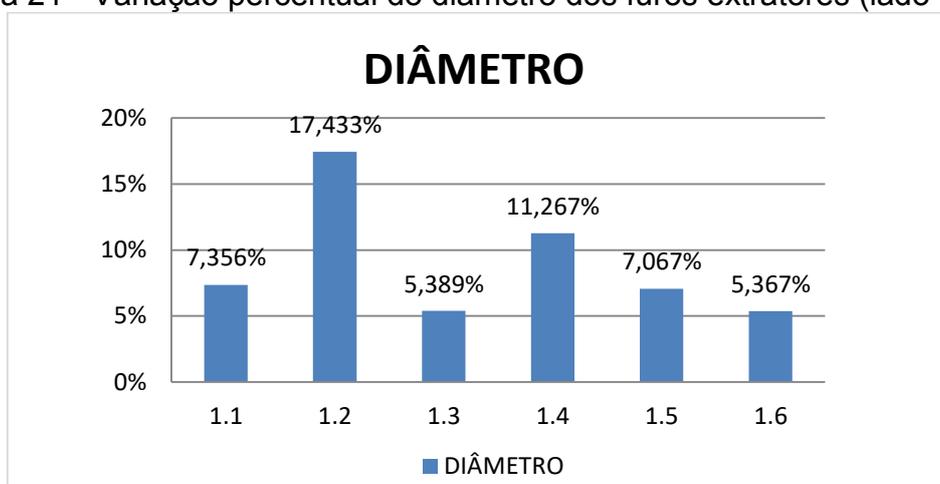
Fonte: Próprio autor

O componente foi impresso pelo processo FDM utilizando os parâmetros citados anteriormente, Tabela 2, mantendo os dados fornecidos pela fabricante. O tempo de impressão para o componente do lado fixo foi de 1 dia, 3 horas e 5 minutos. Já o componente lado móvel teve um tempo total de 23 horas e 26 minutos. Após a impressão os componentes foram submetidos a uma avaliação visual e dimensional, detalhado abaixo.

4.2.1.1 Componente lado móvel

Foram registradas as medições de diâmetros e dimensões básicas nos 3 eixos cartesianos (X, Y e Z) para o componente do lado móvel. Os resultados foram plotados na forma gráfica conforme a Figura 21.

Figura 21 - Variação percentual do diâmetro dos furos extratores (lado móvel)



Fonte: Próprio autor

O diâmetro nominal da peça impressa das dimensões 1.1 até 1.6 do desenho é de 3mm. Foram aplicados três ciclos de medição e feito uma média. Foi encontrada uma grande variação entre diâmetros de mesma dimensão. Um fator importante a ser considerado nessa variação pode ser uma limitação do equipamento em controlar o fluxo de material para pequenas dimensões, a calibração do diâmetro do bico de extrusão e a calibração dos movimentos dos eixos X e Y da impressora, principalmente na inversão do sentido de movimento, cuja precisão é definida nos motores de passo responsáveis pelos movimentos ao longo dos eixos.

Em relação a dimensões lineares no eixo Z do componente lado móvel, foi elaborado um gráfico para ilustrar as variações (cotas 3, 6 e 7 do desenho). Foi definido cinco medições para cada cota. A variação dimensional não apresentou valores fora dos padrões para uma impressão FDM. O gráfico da Figura 22 mostra a média e o desvio padrão encontrado nas medições, apresentados na tabela do ANEXO IV.

Figura 22 - Variação dimensional do eixo Z (lado móvel)



Fonte: Próprio autor

A mesma análise foi feita para as coordenadas dos eixos X e Y no componente lado móvel. A análise segue abaixo na Figura 23.

Figura 23 - Variação dimensional dos eixos X e Y (lado móvel)



Fonte: Próprio autor

4.2.1.2 Componente lado fixo

Seguindo uma lógica de medição que permitiu avaliar os eixos X, Y e Z do componente lado móvel do molde, o componente lado fixo, que foi impresso com os mesmos parâmetros de extrusão e velocidades, foi dimensionado conforme o gráfico abaixo na Figura 24.

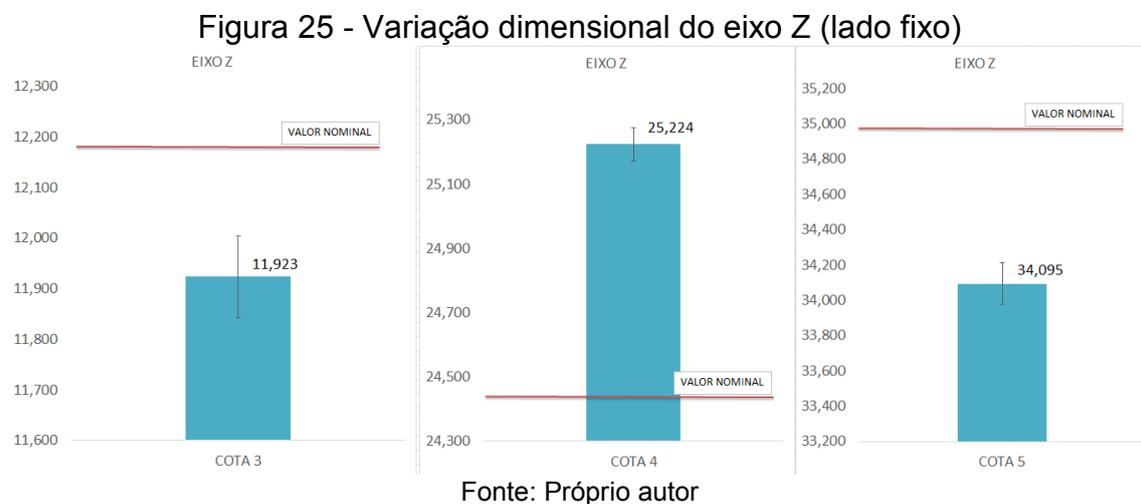
Figura 24 - Variação dimensional dos eixos X e Y (lado fixo)



Fonte: Próprio autor

O componente lado fixo tem uma forma geométrica bem definida, retangular, e isso é um fator benéfico ao processo de extrusão. Porém, conforme mostrado na figura anterior, a geometria tem diferenças de preenchimento, em função dos vazios responsáveis em aliviar peso e fazer uma melhor troca térmica durante o processo de injeção (comparado ao bloco maciço). Não houve uma variação que merece ser analisada, conforme o gráfico, visto o valor do desvio padrão.

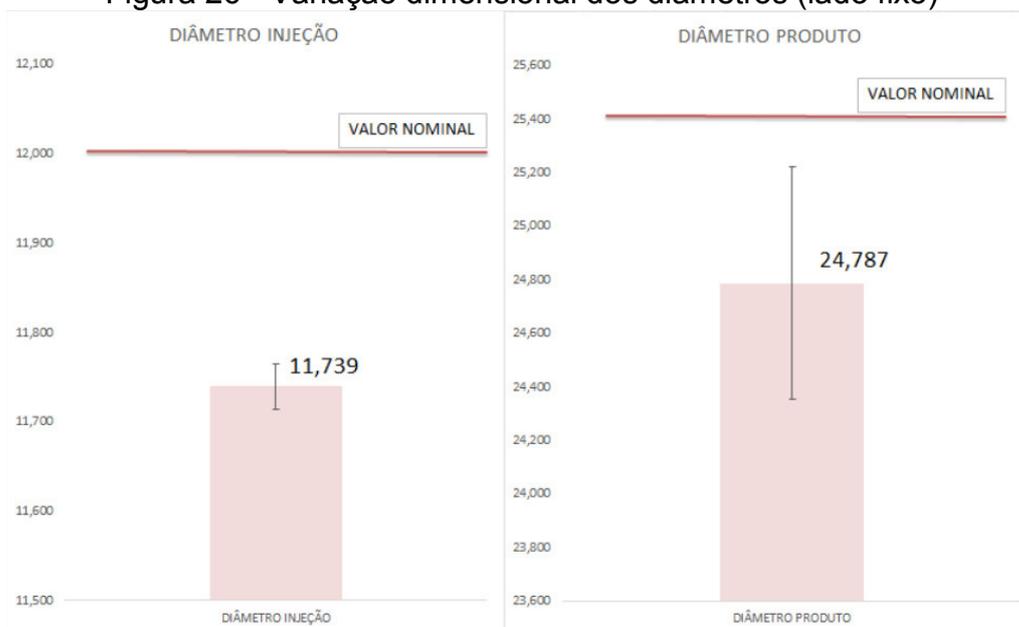
Para o eixo Z, conforme ilustrado na Figura 25, percebe-se uma variação maior.



O eixo Z, da figura 25, apresenta variação maior nas cotas que possuem relação com a base, região onde inicia a impressão FDM. Esse apoio na base da impressora causou defeitos tanto na dimensão quanto no acabamento da superfície. Esta situação é vista claramente na COTA 5, onde a diferença do real para o valor nominal ficou próximo de 1mm.

Em relação aos diâmetros que puderam ser medidos com o processo de medição proposto, tivemos duas situações distintas, conforme mostra o gráfico da Figura 26.

Figura 26 - Variação dimensional dos diâmetros (lado fixo)



Fonte: Próprio autor

O diâmetro do alojamento da bucha de injeção (gráfico lado esquerdo), é uma geometria de fácil medição e teve um comportamento muito similar às outras geometrias listadas anteriormente. Por se tratar de um diâmetro de 12mm (valor nominal), foi possível perceber uma variação muito menor, visto os diâmetros de 3mm medidos no componente do lado móvel.

Já o diâmetro do produto foi medido em uma região onde inicia um raio de arredondamento e a geometria apresenta uma conicidade, necessária para o correto funcionamento do molde de injeção, permitindo uma fácil extração. Esta conicidade provoca um efeito tipo escada quando se precisa fatiar uma peça em camadas (0,2mm de altura). Devido a isso, a grande variação se deu em função do processo de medição, com desvio padrão fora dos padrões anteriores.

4.2.2 Debinding

O processo de debinding apresentou um resultado próximo ao esperado, porém com algumas deformações. Conforme a Figura 27, a cavidade impressa apresentou uma separação de camadas não percebida na fase de impressão.

Figura 27 - Defeitos no processo pós debinding



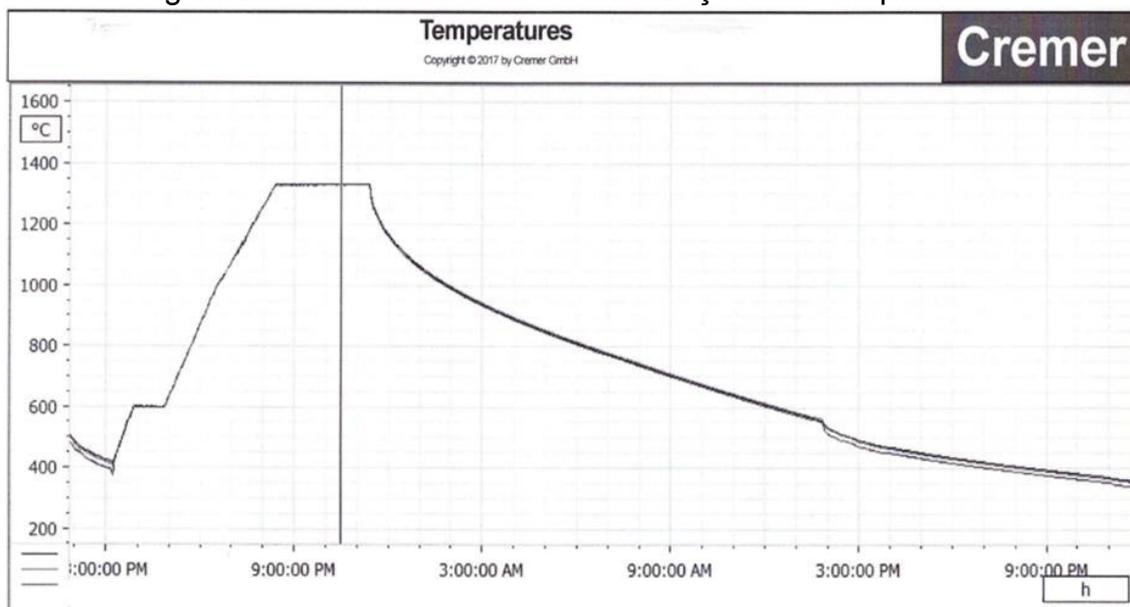
Fonte: Próprio autor

4.2.3 Sinterização

Conforme estudo publicado por Singh *et al.* (2021), uma nova fase conhecida como δ -ferrita, uma solução de ferro, carbono e elementos de liga se forma entre 1270 e 1300°C e provoca o aumento do tamanho e quantidade de grãos e induz uma considerável redução da porosidade e melhora consideravelmente a sinterização. Também foi demonstrado que com o aumento das temperaturas, ocorre o crescimento da δ -ferrita, reduz as porosidades rapidamente e os poros esferoidizam e fecham. Menores porosidades resultaram em uma melhor ligação e um aumento da resistência a tração.

O gráfico do ciclo de sinterização utilizado para sinterizar os componentes lado fixo e lado móvel, é mostrado abaixo (Figura 28), plotado diretamente pelo forno de sinterização.

Figura 28 - Gráfico do ciclo de sinterização dos componentes

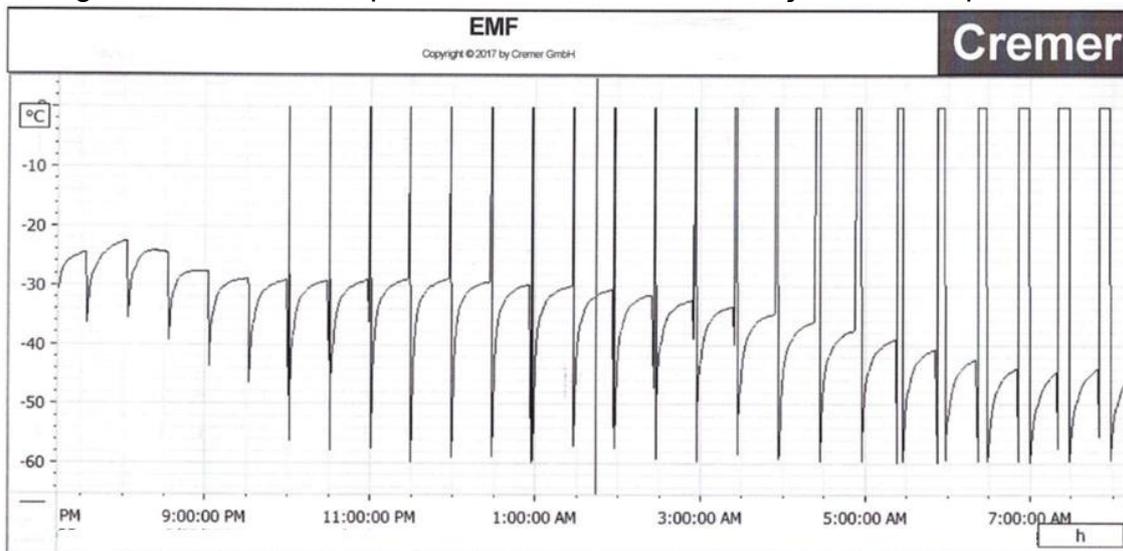


Fonte: Próprio autor

A Figura 28 ilustra graficamente o ciclo de sinterização, constituído por uma pré sinterização, na temperatura de 600°C, seguido da sinterização a 1380°C com atmosfera de hidrogênio e após realizado o resfriamento. Na pré sinterização, ocorre a remoção do restante do polímero termicamente, não extraído quimicamente no debinding. Durante a sinterização ocorre a contração volumétrica das amostras, gerando o componente de aço na condição final (KEDZIORA et al., 2022).

O ponto de orvalho é um dado controlado durante o processo de sinterização, com o objetivo de avaliar se a atmosfera dentro do forno reativa ou protetora e previne que ocorram mudanças na superfície da peça como oxidação ou descarbonetação (KEDZIORA et al., 2022). Este controle é ajustável pelo operador do forno, onde é possível através da mistura de gases, manipular a atmosfera e atingir os melhores resultados. Esse controle também é controlado pelo forno e apresentado na forma de um gráfico de controle que está mostrado na Figura 29.

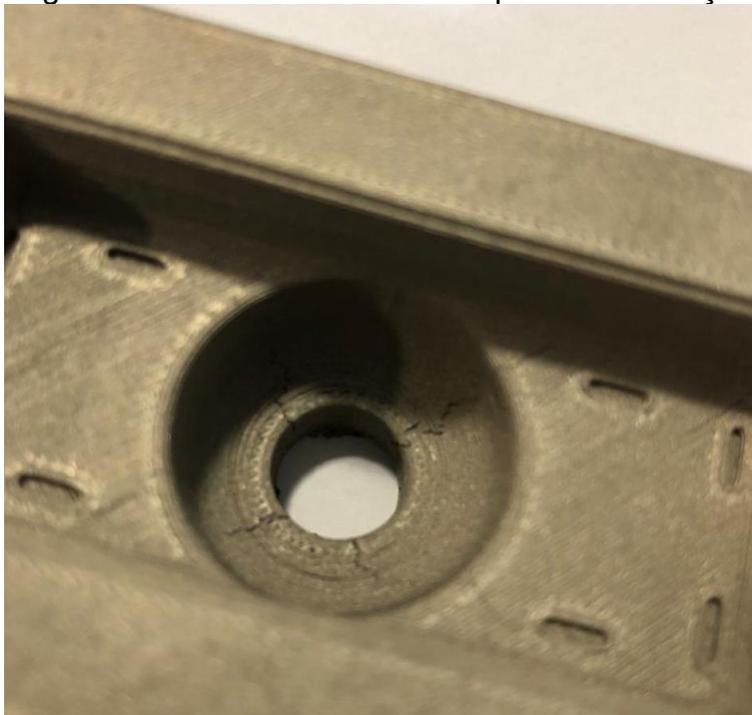
Figura 29 - Gráfico de ponto de orvalho na sinterização dos componentes



Fonte: Próprio autor

Como se observa na Figura 30, a cavidade impressa apresentou trincas na região da furação do alojamento do bico de injeção.

Figura 30 - Trincas na cavidade após a sinterização



Fonte: Próprio autor

O componente lado móvel mostrou um defeito de abaloamento na base. Uma hipótese provável é que possa ter ocorrido um descolamento entre as

camadas na remoção da peça da mesa de impressão, em função da aderência entre base e mesa durante a impressão, ou pelos defeitos ocasionados pelos vazios entre as camadas, o que ressaltou a deformação após os processos de debinding e sinterização (KEDZIORA et al., 2022).

No componente lado fixo, cavidade do molde, o descolamento das camadas vistas no processo de debinding foi ampliada. Esse efeito pode ser resultado originado na impressão 3D, onde a sobreposição de camadas pode não ter sido a mais adequada, pode ter sido resultado de uma instabilidade no controle dos movimentos da impressora, deslocando mais do que o programado no software de fatiamento e problemas de sub-extrusão que pode ter sido provocado por variações de temperatura do bico de extrusão e que pode ter prejudicado na sobreposição de camadas. Do ponto de vista metalúrgico, tendo em vista que o processo foi obtido por extrusão de camadas, como a peça tem variações de massa, regiões com vazios internos, pode ter ocasionado fissuras na espessura, conforme mostrado na Figura 31.

Figura 31 - Deformações após a sinterização do componente lado fixo



Fonte: Próprio autor

Tanto os defeitos apresentados no componente lado fixo quanto no móvel inviabilizaram utilizar a refrigeração dimensionada no modelo 3D, pois as trincas e os espaçamentos entre camadas gerados pós sinterização deixaram as peças sem isolamento entre o circuito de água e a parte externa, o qual tanto

gases quanto a água tiveram contato direto com a massa fundida do polímero injetado, prejudicando o resultado da injeção.

Após a sinterização, os componentes foram submetidos a novo processo de medição, com o objetivo de entender a contração, avaliada nos três eixos e seguindo as mesmas dimensões avaliadas no processo de impressão 3D.

4.2.3.1 Componente lado móvel

A variação do componente lado móvel apresentou percentuais próximos do fator padrão fornecido pelo fabricante. A Tabela 7 demonstra um comparativo entre fatores de contração para cada eixo e uma média entre os diâmetros medidos na peça impressa, após a sinterização.

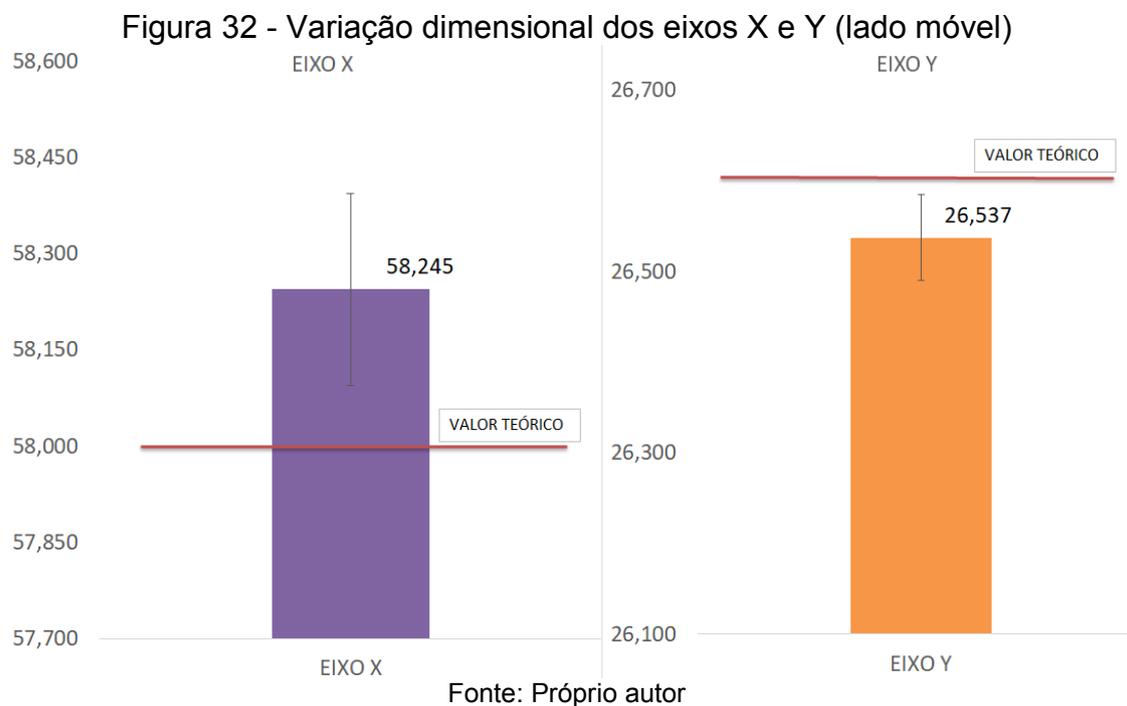
Tabela 7 - Comparação da contração teórica x prática (lado móvel)

EIXO	TEÓRICO	PRÁTICA
X	16,5%	16,086%
Y	16,5%	16,6%
Z	20,7%	19,9%
Ø	16,5%	12,7%

Fonte: Próprio autor

O resultado foi obtido fazendo uma relação entre a média das medições da peça impressa, representado no gráfico como “VALOR TEÓRICO” e da peça sinterizada, sem considerar as dimensões nominais de projeto. Nessa relação pode-se garantir um resultado confiável para entender as restrições entre o projeto e a peça após sinterização. As dimensões do eixo Z apresenta uma variação maior que os eixos X e Y. Esta variação pode ser o efeito da sobreposição entre as camadas na impressão. A variação entre o diâmetro do bico na prática e o diâmetro programado no software de fatiamento, a espessura da camada e a calibração dos movimentos da máquina impressora também pode ser um fator determinante para a maior variação do eixo Z.

A média e desvio padrão para o eixo X e eixo Y estão representados no gráfico da Figura 32.



As duas dimensões representadas graficamente na Figura 33 correspondem à média e variação das medições de duas dimensões do eixo Z para o componente lado móvel sinterizado. A cota 3 não foi considerada nessa medição em função das deformações da base geradas pelo processo de sinterização e que posteriormente deve ser calibrada no processo de usinagem.

A variação das duas cotas do eixo Z tiveram um percentual muito próximo entre si, sendo 18,89% para a cota 6 e 19,95% para a cota 7. Esse resultado mostra que, em uma mesma configuração de impressão, existe uma condição de contração na sinterização constante, porém é necessário considerar algum sobremetal de segurança no caso de tolerâncias de baixa amplitude.

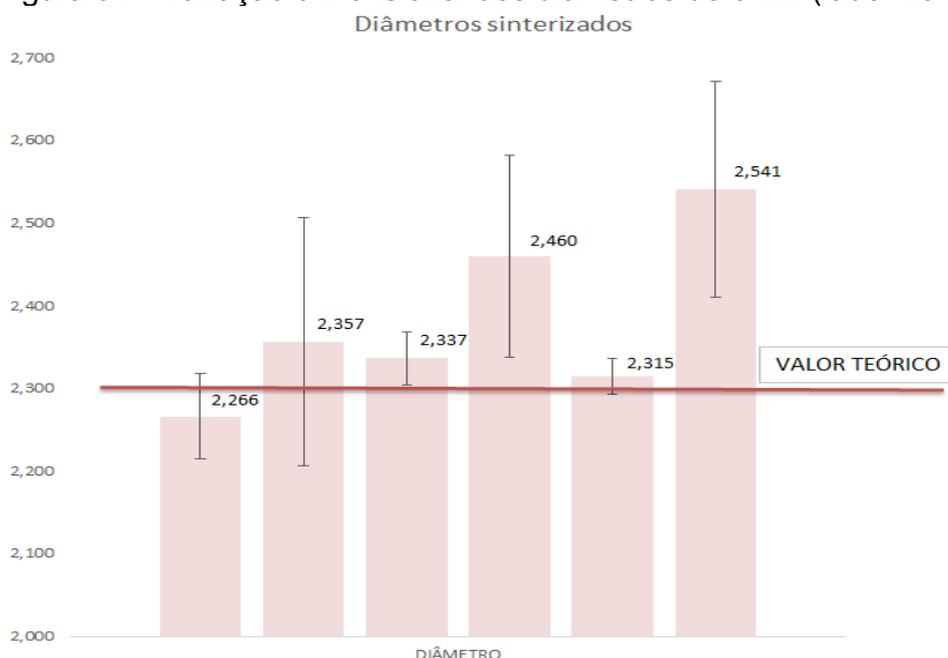
Figura 33 - Variação dimensional do eixo Z (lado móvel)



Fonte: Próprio autor

Em relação aos diâmetros, o processo de medição mostrou uma variação fora do esperado, porém as deformações entre as camadas e a falta de estabilidade do processo de deposição, por se tratar de diâmetros de 3mm, justificam os valores que estão ilustrados na Figura 34.

Figura 34 - Variação dimensional dos diâmetros de 3mm (lado móvel)

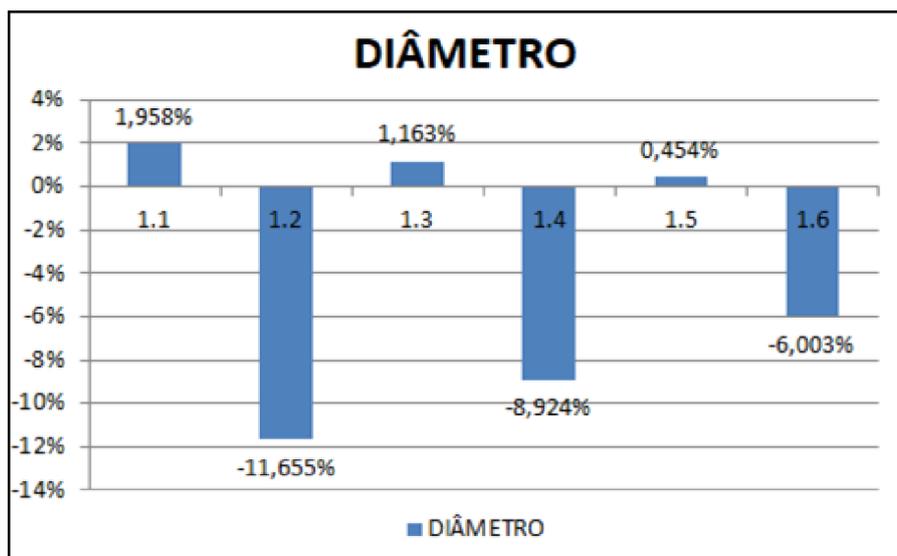


Fonte: Próprio autor

O gráfico da Figura 35 representa em percentual as variações dos diâmetros, os quais tem mesmo valor em diâmetro e que entre eles trazem

valores diferentes e com amplitudes expressivas, mesmo sendo todos de mesmo valor teórico, o que reforça a ideia de que o processo perde estabilidade para os diâmetros menores e precisam de atenção na definição de projeto, para que sejam qualificados posteriormente em processos de calibração posterior.

Figura 35 - Comparação da variação dimensional entre os diâmetros



Fonte: Próprio autor

4.2.3.2 Componente lado fixo

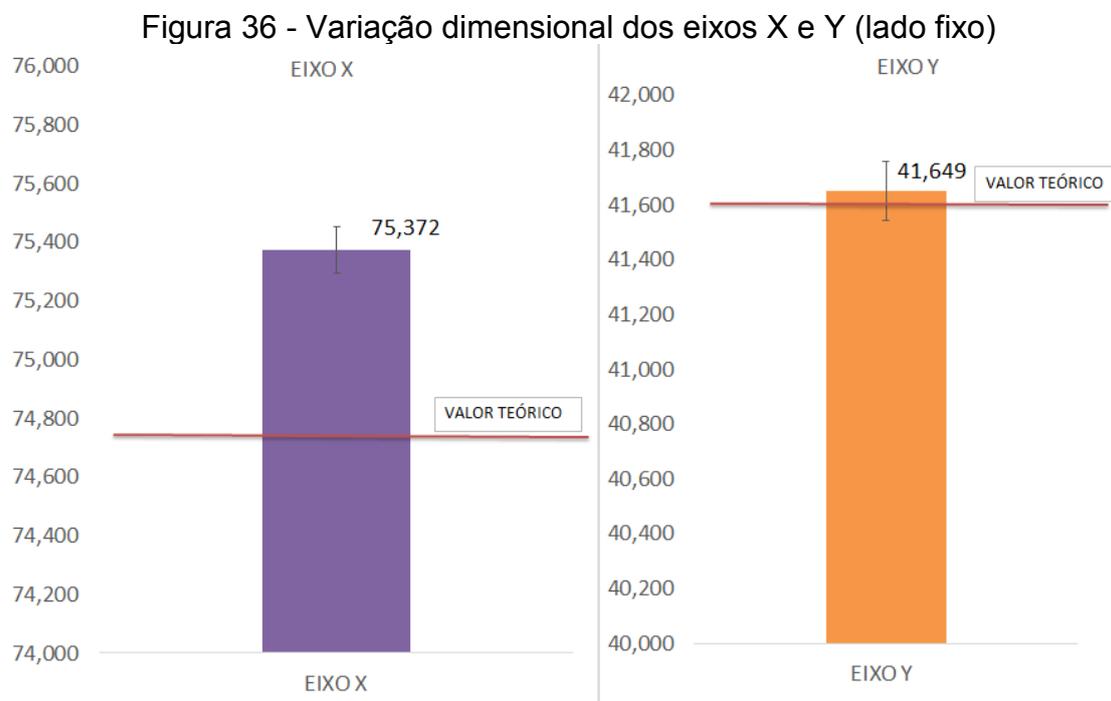
Em condições de avaliação dimensional similar ao lado móvel, o componente do lado fixo foi medido e apresentou uma contração média para cada eixo conforme a Tabela 8.

Tabela 8 - Comparação da contração teórica x prática (lado fixo)

EIXO	TEÓRICO	PRÁTICA
X	16,5%	15,836%
Y	16,5%	16,4%
Z	20,7%	20,3%
∅	16,5%	13,1%

Fonte: Próprio autor

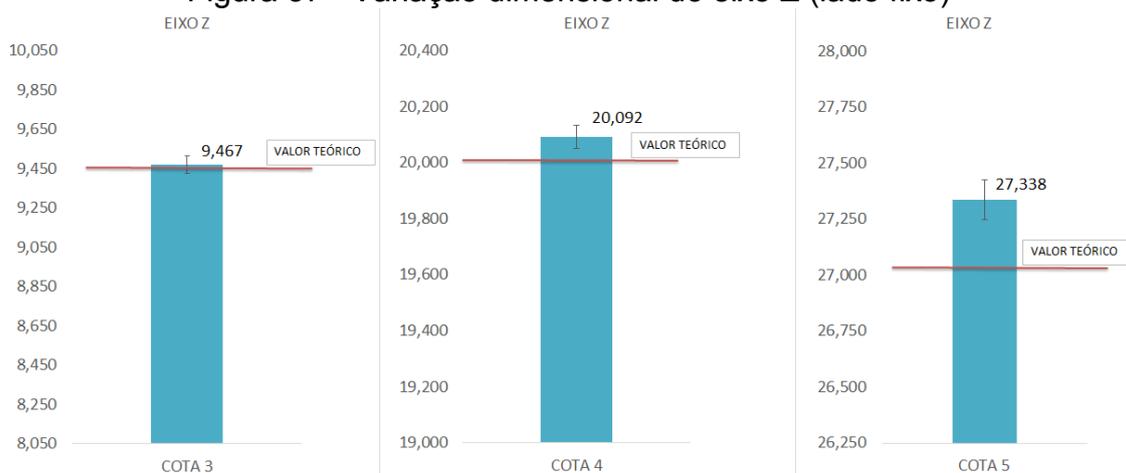
Para os eixos X e Y (Figura 36), seguindo um comportamento similar ao componente lado móvel, os percentuais de contração se mantiveram próximos.



Fonte: Próprio autor

No eixo Z ocorreram contrações com valores próximos da especificação do fabricante. Para a cota 5, na qual a referência é o fundo do componente, houve uma média afastada da cota teórica devido a deformações expressivas na face de medição. Nesse caso, como é uma face que permite qualificação e a deformação está diretamente ligada ao processo de impressão e descolagem do componente após a impressão, não é um resultado que preocupa o experimento, mas é importante ser destacado. O gráfico das variações está representado na Figura 37.

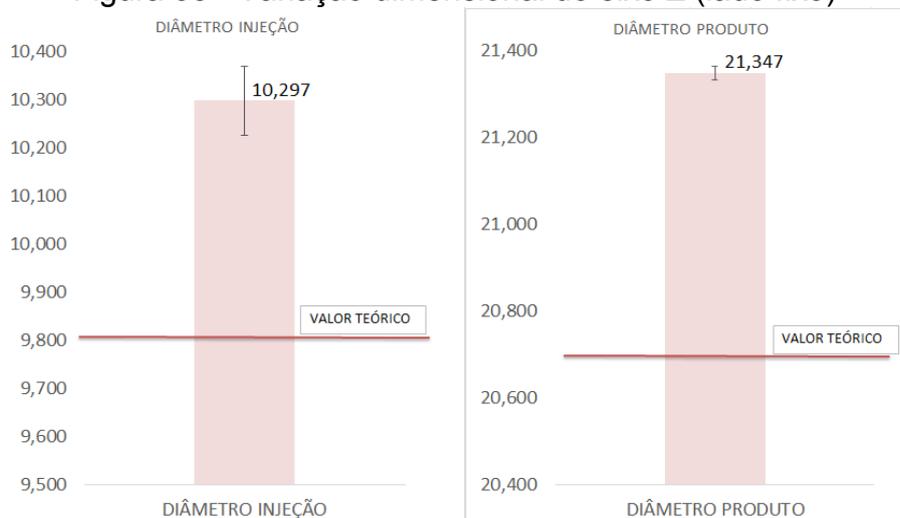
Figura 37 - Variação dimensional do eixo Z (lado fixo)



Fonte: Próprio autor

Contrapondo ao caso anterior, do componente lado móvel, os diâmetros tiveram pouca variação, o que mostra a Figura 38, com desvios padrões de baixa amplitude e reforça a ideia de que para diâmetros maiores a impressora consegue fazer a deposição do material e a sobreposição das camadas de forma mais homogênea, o que traz melhores resultados para o dimensional das peças e uma chance maior de evitar compensações e calibrações posteriores ao processo de sinterização, com processos de usinagem. O processo de medição, neste caso, também traz um resultado mais próximo do real, visto que não apresentou elevadas rugosidades na superfície e consequentemente melhores referências para efetuar a medição.

Figura 38 - Variação dimensional do eixo Z (lado fixo)



Fonte: Próprio autor

4.2.4 Usinagem

Os componentes gerados por sinterização e os gerados por processos convencionais tiveram roteiros de operações distintos, porém as mesmas operações de calibração, com estratégias de usinagem idênticas e mesmas ferramentas para que se pudesse fazer uma comparação entre acabamentos e que todos os componentes pudessem entrar no porta molde com ajustes de encaixe semelhante.

4.2.4.1 Usinagem do componente impresso

Para os componentes impressos, basicamente foram estabelecidos dois processos convencionais de usinagem: faceamento e fresamento tangencial.

Para o faceamento, foi utilizado um cabeçote de 16mm de diâmetro com 2 insertos de classe H, fabricante ISCAR, com o código HM90APKT1003 IC908. Para fixação foi utilizado um suporte para cabeçote referência BT40 (Figura 39).

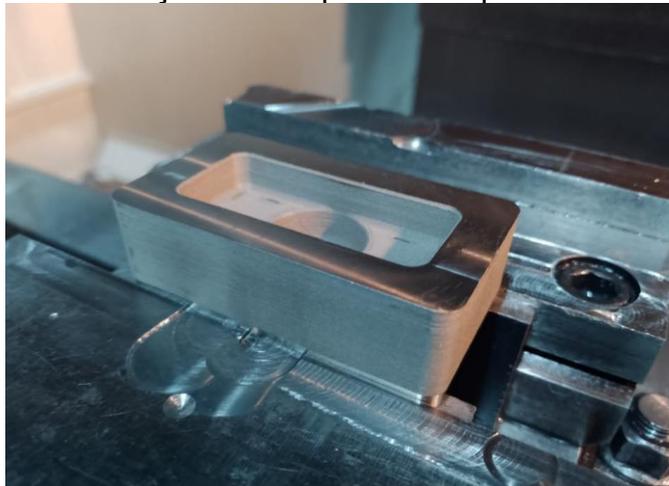
Figura 39 - Inserto ISCAR e suporte utilizados para faceamento



Fonte: Próprio autor

A máquina utilizada foi uma MAXIMILL QMC850 e a fixação da peça foi feito através de uma morsa de precisão (Figura 40).

Figura 40 - Fixação do componente impresso na máquina



Fonte: Próprio autor

Para a operação de faceamento foi aplicado uma rotação de 4000 rpm e um avanço de 1200 mm/min.

Na operação de calibração dimensional, foi utilizado uma fresa de topo reta com diâmetro de 16mm, com 4 arestas de corte e com cobertura, para reduzir o atrito, facilitar o escoamento do cavaco e melhorar a qualidade superficial (Figura 41).

Figura 41 - Fresa de topo Ø16mm utilizada para a calibração

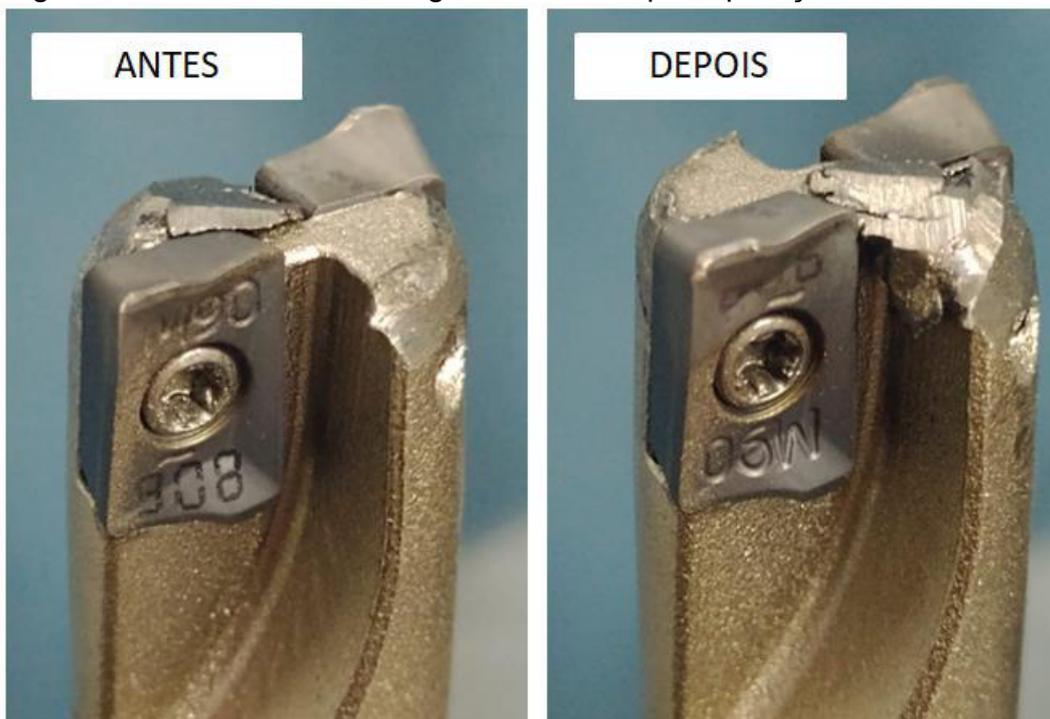


Fonte: Próprio autor

Em relação aos parâmetros de corte para a operação de calibração, fresamento tangencial, foi utilizada uma rotação de 4800 rpm e um avanço de 960 mm/min.

Na operação de faceamento foi possível analisar visualmente um leve desgaste na aresta de corte da ferramenta (Figura 42) e na operação de fresamento tangencial não foi possível observar desgaste visto a olho nu.

Figura 42 - Análise visual desgaste antes e após operação de faceamento



Fonte: Próprio autor

O resultado do acabamento atendeu perfeitamente às premissas de montagem no porta inserto, assegurando ao componente calibrado uma condição funcional no paralelismo entre as faces usinadas e uma tolerância de encaixe que permitiu ao conjunto do molde uma estabilidade dimensional que atende às premissas de projeto (Figura 43).

Figura 43 - Resultado das operações de calibração



Fonte: Próprio autor

4.2.4.2 Usinagem do componente a partir do bloco bruto

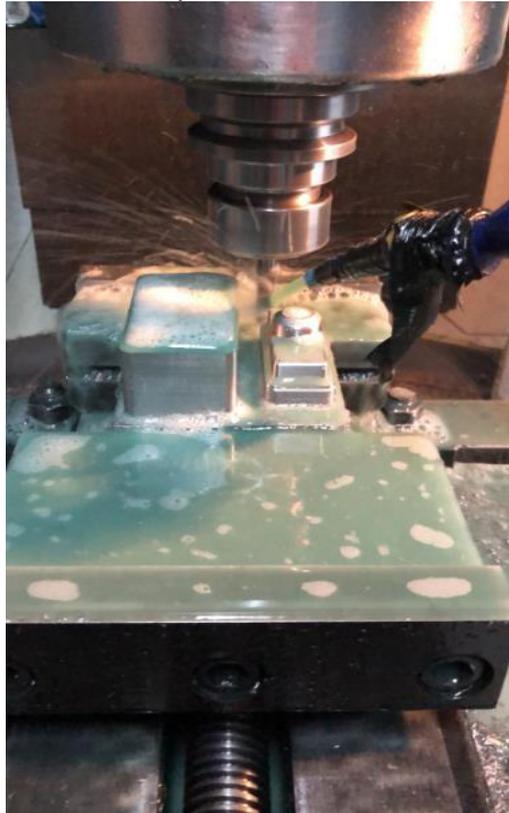
Para os componentes que foram usinados a partir de um bloco bruto (Figura 44), foi definida uma sequência de operações de usinagem, conforme mostra a Tabela 9.

Tabela 9 - Operações para usinar componentes a partir de bloco bruto

PEÇA	N° OP	NOME DA OPERAÇÃO	FERRAMENTA	PARÂMETROS DE CORTE		TEMPO (min)
				AVANÇO (m/min)	ROTAÇÃO (RPM)	
LADO MÓVEL	0	SETUP DE MÁQUINA				45
	1	DESBASTE	TOROIDAL Ø16 RAIOS 1	1720	4300	12,25
	2	FACEAMENTO	TOROIDAL Ø8 RAIOS 1	1145	4770	1,25
	3	ACABAMENTO	TOROIDAL Ø8 RAIOS 1	1145	4770	14,75
	4	FURO DE CENTRO	BROCA DE CENTRO	50	950	0,25
	5	FURO DA EXTRAÇÃO	BROCA Ø2,3	30	850	4,5
LADO FIXO	0	SETUP DE MÁQUINA				45
	1	DESBASTE	TOROIDAL Ø16 RAIOS 1	1720	4300	9,5
	2	FACEAMENTO	TOROIDAL Ø8 RAIOS 1	1145	4770	0,5
	3	ACABAMENTO	TOROIDAL Ø8 RAIOS 1	1145	4770	8,75
	4	FURO DE CENTRO	BROCA DE CENTRO	50	950	0,25
	5	FURO BUCHA INJEÇÃO	BROCA Ø9,8	50	500	2,75

Fonte: Próprio autor

Figura 44 - Usinagem dos componentes lado fixo e móvel (material bruto)



Fonte: Próprio autor

A estratégia para os componentes totalmente usinados foi manufacturar os blocos brutos até coincidir com as operações de acabamento dos componentes impressos e, a partir desse ponto, usinar ambos com as mesmas estratégias de usinagem e garantir um padrão dimensional de montagem. Uma atividade adicional foi acrescentada ao componente usinado lado fixo, devido à dificuldade de usinagem de detalhes pequenos da cavidade. Para atender à solicitação de projeto, foi necessário um processo de erosão por penetração, utilizando um eletro de cobre eletrolítico, Figura 45.

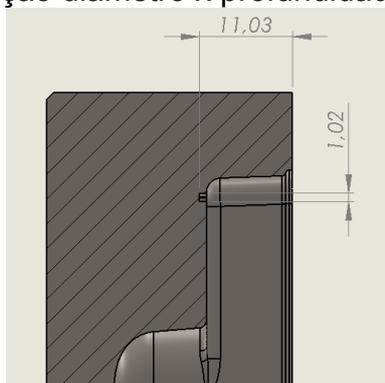
Figura 45 - Eletro erosão por penetração do componente lado fixo



Fonte: Próprio autor

Os parâmetros utilizados para o processo, baseando-se no tipo de acabamento, com pouca rugosidade devido a necessidade de extração e no desgaste mínimo do eletrodo foram tensão de 100V e corrente de 4,5A, com um tempo de 1 segundo de descarga elétrica por ciclo. O processo de erosão por penetração foi uma operação necessária para garantir os detalhes do produto em que as máquinas CNC disponíveis não permitiram a usinagem. Isso se dá por uma relação de restrições impostas pela geometria, onde apresentou detalhes pequenos em alturas profundas, como mostra a Figura 46.

Figura 46 - Relação diâmetro x profundidade para usinagem



Fonte: Próprio autor

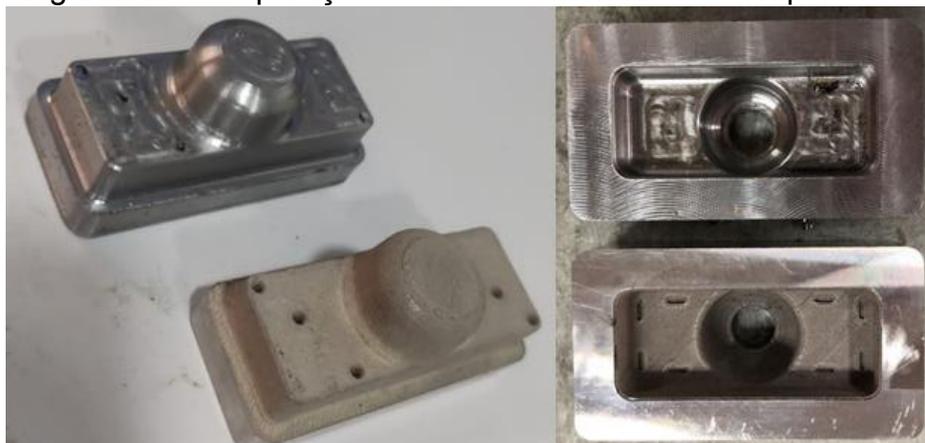
4.2.4.3 Comparação entre os componentes usinados e impressos

De uma forma geral, houve diferenças de acabamento superficial entre os componentes usinados do bloco bruto e os qualificados a partir de impressão 3D. Do ponto de vista dimensional, nos dois casos foi preciso qualificar as dimensões de encaixe no porta molde. As dimensões da cavidade teve uma maior variação se comparada ao modelo CAD utilizado para impressão e para usinagem, porém houve mais etapas de processo para se chegar ao mesmo nível de detalhamento do componente impresso.

Devido à sobreposição de camadas, o componente impresso apresentou um acabamento superficial mais grosseiro, na forma de textura. Isso pode ser um ponto positivo se fosse necessário um acabamento texturizado. Porém, na maioria dos casos, onde se precisa de uma superfície de produto lisa, o processo de usinagem a partir do bloco bruto, trouxe um melhor resultado. Por outro lado, texturas podem ser prejudiciais ao processo de injeção, onde a superfície cria barreiras para a extração da peça injetada, ocasionando deformações nas paredes ou marcas salientes de extratores, devido ao atrito gerado pela parede texturizada.

No caso de uma textura corretamente definida no projeto, pode-se controlar a rugosidade na superfície, já na peça impressa, o resultado é definido na deposição de camadas e depende exclusivamente dos parâmetros definidos no processo de impressão, da qualidade da impressora e da estabilidade na hora da extrusão (SINGH *et al.*, 2021). A comparação entre o componente usinado, sem textura, e o componente impresso estão ilustrados na Figura 47.

Figura 47 - Comparação entre acabamentos dos componentes



Fonte: Próprio autor

4.2.5 Custo x prazo de fabricação dos componentes

Como se trata de dois processos distintos pôde-se fazer uma comparação entre o custo de fabricação do conjunto de componentes impressos e usinados. Os valores de filamento e sinterização são referência de custos informados pelas empresas BASF e TECNOMIM. O custo de hora do equipamento de impressão é uma referência baseada no custo de fabricação de peças utilizado para impressão de protótipos, pela empresa SULINJECT Ltda.

4.2.5.1 Custo x prazo de fabricação do componente impresso

Para o componente impresso o custo de fabricação é composto conforme a Tabela 10.

Tabela 10 - Custo de fabricação da peça impressa

COMPOSIÇÃO DO CUSTO (COMPONENTE IMPRESSO)								
	TEMPO IMPRESSÃO (h)	CUSTO IMPRESSÃO (R\$)	MATERIAL (g)	CUSTO MATERIAL (R\$)	CUSTO SINTERIZAÇÃO (R\$)	CUSTO CALIBRAÇÃO	TOTAL (R\$)	PRAZO FABRICAÇÃO (dias)
COMPONENTE LADO FIXO	27	R\$ 810,00	1065	R\$ 1.416,45	R\$ 720,00	R\$ 150,00	R\$ 3.096,45	4
COMPONENTE LADO MÓVEL	9,3	R\$ 279,00	360	R\$ 478,80	R\$ 640,00	R\$ 150,00	R\$ 1.547,80	3

Fonte: Próprio autor

O custo de calibração é um custo de operação de usinagem em centro de usinagem três eixos que a empresa SULINJECT Ltda. implementou para a venda de serviço para terceiros. O prazo de fabricação apresentado é um tempo médio, desconsiderando alguma possível espera, prática comum no mercado, devido a minimizar os custos de operação do forno de sinterização, ou viabilizar o menor custo possível ao cliente, concentrando um número de peças suficiente para uma carga completa de materiais compatíveis.

4.2.5.2 Custo x prazo de fabricação do componente usinado

O custo de usinagem e prazo de fabricação do componente usinado a partir de um bloco bruto é composto conforme a Tabela 11.

Tabela 11 - Custo de fabricação da peça usinada a partir do bloco bruto

COMPOSIÇÃO DO CUSTO (COMPONENTE USINADO)						
	TEMPO USINAGEM (h)	CUSTO USINAGEM (R\$)	CUSTO MATERIAL (R\$)	CUSTO ELETRO (R\$)	TOTAL (R\$)	PRAZO FABRICAÇÃO (dias)
COMPONENTE LADO FIXO	3,3	R\$ 594,00	R\$ 109,00	R\$ 80,00	R\$ 728,50	18
COMPONENTE LADO MÓVEL	3,11	R\$ 559,80		R\$ -	R\$ 559,80	18

Fonte: Próprio autor

O valor apresentado no material é bloco adquirido pelo fornecedor de aços especiais da região metropolitana de Porto Alegre e o custo de usinagem baseado no número de horas necessárias para fabricação das peças, utilizando o custo de operação de usinagem de um centro de usinagem de três eixos e uma eletro erosão por penetração da empresa SULINJECT Ltda. O prazo de fabricação foi de 18 dias devido principalmente ao prazo de fornecimento do bloco bruto, em que o fornecedor solicita até 10 dias úteis para a liberação e entrega. Para os tempos de usinagem estão desconsiderados no prazo de fabricação, o tempo de espera entre os processos, devido às demandas presente no fluxo da empresa no ato da contratação do serviço.

4.2.5.3 Comparação entre os fatores preço e prazo

O custo de fabricação do conjunto (componente lado fixo e componente lado móvel) gerado pelo processo de impressão FDM foi 339% (trezentos e trinta e nove por cento) maior que o custo de fabricação partindo de um bloco de material bruto e usinado pelos processos convencionais de usinagem.

Já o prazo de fabricação do conjunto de componentes gerados por impressão FDM foi quase cinco vezes menor que o prazo de fabricação necessário para gerar geometrias similares a partir de um bloco bruto.

4.2.6 Injeção

Os componentes usinados a partir de bloco bruto e impressos por FDM foram submetidos à montagem e posteriormente instalados na injetora para os testes de injeção, conforme a Figura 48.

Figura 48 - Comparação entre acabamentos dos componentes



Fonte: Próprio autor

Os blocos os quais foram montados os conjuntos são blocos em alumínio e foram construídos especificamente para a viabilidade da injeção para o experimento.

Devido à similaridade entre as geometrias e a falta de um circuito de refrigeração apropriado, em função das trincas apresentadas no componente

impresso, os parâmetros de injeção foram definidos os mesmos tanto para o conjunto gerado pela impressão FDM, quanto pelo conjunto usinado a partir do bloco bruto. Os parâmetros de injeção estão descritos na Tabela 12.

Tabela 12 - Parâmetros de injeção

COMPOSIÇÃO DO CUSTO (COMPONENTE IMPRESSO)										
CONJUNTO	TEMPERATURA				PRESSÃO INJEÇÃO (Mpa)	PRESSÃO FECHAMENTO (T)	Vazão (cm ³ /s)	TEMPO INJEÇÃO (s)	TEMPO RESFRIAMENTO (s)	TEMPO CICLO (s)
	ZONA 1 (°C)	ZONA 2 (°C)	ZONA 3 (°C)	BICO (°C)						
MAM	160	160	160	80	20	80	12	4.0	50.0	56.0
USINADO	160	160	160	80	20	80	12	4.0	50.0	56.0

Fonte: Próprio autor

4.2.6.1 Primeiro teste do molde

No primeiro teste dos conjuntos a peça pode ser preenchida parcialmente, houve dificuldades no preenchimento da cavidade, onde os dois conjuntos apresentaram falhas, com um maior preenchimento para o conjunto usinado a partir do bloco bruto, mostrado na Figura 49.

Figura 49 - Primeiro teste de injeção conjunto usinado a partir do bloco bruto



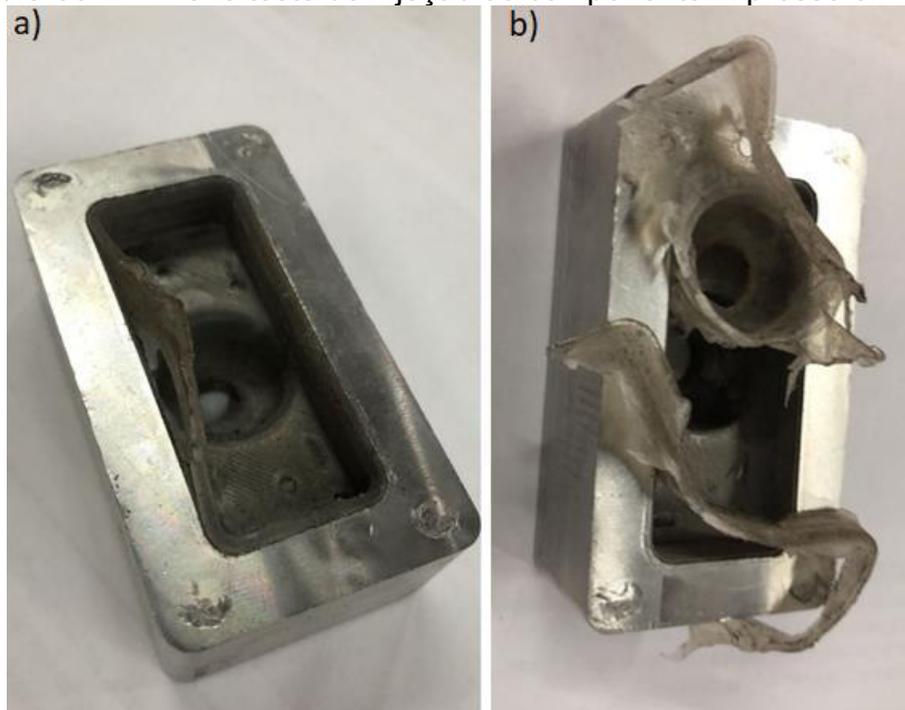
Fonte: Próprio autor

Todos os detalhes da cavidade foram preenchidos, houve uma hesitação em uma das laterais, devido a pouca espessura, o que resultou na divisão em

duas frentes de fluxo de material e consequente defeito no preenchimento próximo a base.

Especificamente para o conjunto impresso por FDM, houve muita dificuldade em extrair a peça de dentro da cavidade. Após a tentativa de injeção com parâmetros para forçar o preenchimento, levou ao preenchimento total, mas também a retenção da peça injetada, interrupção do experimento e uma avaliação que resultou na usinagem de parte da superfície do componente lado fixo, com o objetivo de aumentar a parede da peça em 0,5mm e consequente retirada da rugosidade presente devido ao resultado gerado pela impressão. O resultado é mostrado na Figura 50, na etapa de peça retida dentro da cavidade (a) e peça extraída da cavidade com a ajuda de um alicate (b).

Figura 50 - Primeiro teste de injeção do componente impresso em FDM



Fonte: Próprio autor

4.2.6.2 Segundo teste do molde

Para o segundo teste do molde, algumas modificações foram feitas nos componentes, na intenção de reter a peça no lado da extração e melhorar o preenchimento. No conjunto de componentes impressos houve modificações

de aumento de espessura. Isso foi necessário devido à variação entre o modelo CAD e a peça sinterizada, onde foram encontradas dimensões menores que o projetado durante a extrusão na impressora FDM. Para solucionar todas as dificuldades, cada parte do molde teve a respectiva ação.

A primeira modificação foi feita na cavidade lado fixo do componente impresso, para aumentar a espessura e melhorar o preenchimento, eliminando a hesitação e retirando a rugosidade das paredes laterais, conforme mostra a Figura 51.

Figura 51 - Repasse para aumento da espessura do componente impresso



Fonte: Próprio autor

No caso do componente do lado móvel, tanto o impresso quanto o usinado sofreu a mesma modificação, usinando um canal ao longo da peça, criando uma retenção com o objetivo de ter o produto injetado retido no lado da

extração, permitindo a atuação dos pinos extratores para a expulsão de dentro do macho e assim deixar a máquina trabalhando de forma cíclica e automática, ou seja, sem a necessidade de interrupções para extrair a peça injetada manualmente. A modificação está ilustrada na Figura 52.

Figura 52 - Usinagem da retenção no componente lado móvel



Fonte: Próprio autor

Uma ação muito necessária foi tomada no componente impresso lado móvel para permitir que a extração fosse possível sem danificar a peça injetada. Foi reduzida a rugosidade deixada pelas camadas da impressão 3D e novamente montada no conjunto e submetida ao teste de injeção, conforme mostrado a Figura 53.

Figura 53 - Usinagem para redução da textura do componente impresso



Fonte: Próprio autor

Os conjuntos foram submetidos aos testes e ambos apresentaram resultados similares em relação ao funcionamento. Foi estimado uma produção de cinco horas ininterruptas de injeção de cada conjunto, somando um total de aproximadamente trezentos ciclos, utilizando o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) virgem para o teste e foram separadas amostras de três peças no início, meio e final do lote.

Nenhum dos conjuntos apresentou marcas de desgaste nas paredes, na superfície de fechamento ou trincas. Foram feitas medições de cotas básicas para avaliar uma possível deformação, onde foram identificadas variações entre 20 e 50 micrometros. Diferenças dessa grandeza não caracterizam sinal de desgaste, mas sim uma possível variação de temperatura da massa fundida ou dos componentes do molde. O resultado da injeção é ilustrado na Figura 54.

Figura 54 - Amostras injetadas no segundo teste do molde



Fonte: Próprio autor

4.2.7 Comparação entre processos

De uma forma geral, a Tabela 13 mostra o resultado final em cada processo, em características financeiras, cronológicas, ambientais e de aplicação final.

Tabela 13 - Comparação entre os processos usinado x impresso

COMPONENTE	FABRICAÇÃO						INJEÇÃO		
	CUSTO TOTAL	PRAZO	USINAGEM AJUSTE	ACABAMENTO FINAL	RESÍDUO (% VOLUME)	TRATAMENTO TÉRMICO	PRESSÃO INJEÇÃO	PRESSÃO FECHAMENTO	TEMPO CICLO
IMPRESSO	R\$ 4.644,25	4 DIAS	SIM	SIM	BAIXO	RECOMENDADO	20 MPa	80 T	56 s
USINADO	R\$ 1.288,30	18 DIAS	SIM	SIM	ALTO	RECOMENDADO	20 MPa	80 T	56 s

Fonte: Próprio autor

A aplicação da manufatura aditiva se apresenta de forma muito clara como sendo um benefício sobre uma ótica ambiental, devido a redução de agentes contaminantes gerados pelo processo de usinagem (óleos, fluídos e sucata). O custo da matéria prima, principalmente, é um grande desafio, porém alguns processos ainda podem ser considerados, no que se refere à estrutura dos componentes, e a viabilidade no caso da utilização de software que interprete as cargas aplicadas e se possa construir uma peça leve e resistente suficiente para antes as pressões de fechamento e de injeção (TOFAIL *et al.*, 2018).

4.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

Cada corpo de prova foi submetido ao ensaio, conforme mostra a Figura 55 e os resultados apresentados na Tabela 14.

Figura 55 - Resultado do ensaio de tração



Fonte: Próprio autor

Tabela 14 - Resultado das propriedades mecânicas do ensaio de tração

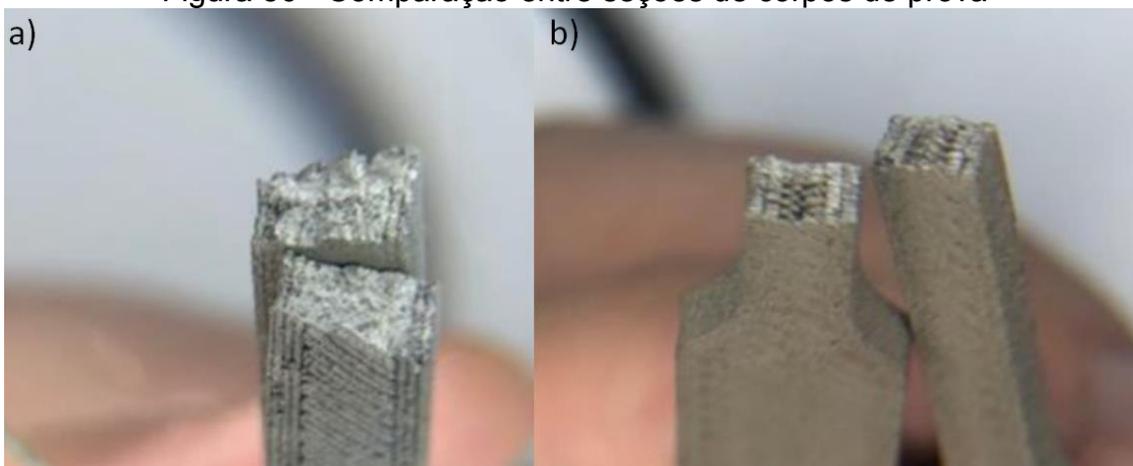
RESULTADO DO ENSAIO DE TRAÇÃO					
CP	TENSÃO MÁXIMA (MPa)	TENSÃO DE ESCOAMENTO (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)	DEFORMAÇÃO MÁXIMA (mm)	DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA (%)
1	482,94	425,64	11471,85	4,41	10,83
2	466,86	399,66	11509,59	3,51	8,62
3	484,13	414,41	10883,16	4	9,83

Fonte: Próprio autor

Os corpos de prova utilizados foram definidos com 100% de preenchimento, ou seja, sem qualquer vazio interno e com camadas alternando em 45° e 135° no sentido de impressão, recomendado pelo fabricante do filamento.

Na sequência de ensaios de tração, foram aplicadas cargas de tração em dois corpos de prova com preenchimento de 50%, para interpretar a viabilidade de fabricar componentes em aço inoxidável 17 4PH impressos e sinterizados. O resultado do ensaio de tração foi instável, onde um dos corpos de prova obteve uma tensão máxima aproximada de 68 MPa e o outro próximo de 180 MPa. A Figura 56 apresenta um comparativo entre os corpos de prova com preenchimento total (a) e preenchimento parcial (b).

Figura 56 - Comparação entre seções de corpos de prova



Fonte: Próprio autor

Fatores como número de camadas nas paredes, ou espessura das paredes, velocidade de preenchimento, fluxo de material no bico, sobreposição de camadas também podem ter forte influência no resultado do ensaio de tração.

Os resultados dos ensaios mecânicos das amostras sinterizadas podem apresentar aumentos significativos na tensão de escoamento e tensão máxima após a aplicação do tratamento térmico de solubilização e envelhecimento.

Medeiros (2015) estudou o efeito da Nitretação do aço 17 4PH após a solubilização. Foi possível aumentar a resistência mecânica do substrato e provocar aumento da microdureza superficial possibilitando o aumento da vida em fadiga, resistência ao desgaste e demais propriedades tribológicas. A nitretação a plasma aplicada nessa classe de aços pode apresentar uma cinética de difusão de nitrogênio potencializada, sendo um fator de elevada relevância na melhora das propriedades de engenharia de superfícies.

Os conceitos de austenita expandida e martensita expandida colaboram para manutenção da resistência à corrosão em aços inoxidáveis após a aplicação do tratamento termoquímico de nitretação a plasma, podendo ser realizado em temperaturas inferiores à de fragilização ou sensitização dos aços inoxidáveis. Desta forma podem ser implementados processos termoquímicos junto com a manufatura aditiva metálica, representando o estado da arte do conhecimento de ambas as tecnologias (MEDEIROS, 2015).

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados e discussões, conclui-se que:

- O desenvolvimento dos insertos para os moldes de injeção polimérica apresentou potencial capacidade de atendimento das especificações exigidas para a aplicação.
- O filamento definido foi do aço inoxidável endurecido por precipitação Ultrafuse 17 4PH. O alívio de massa no componente impresso foi um fator relevante para o custo de fabricação e pode auxiliar no equilíbrio térmico do componente impresso, auxiliando na dissipação do calor de uma forma mais homogênea em relação ao usinado.
- Foram definidos parâmetros de debinding, detectando fissuras que podem ser evitadas estudando um ciclo específico para peças impressas. Foram feitos três ciclos consecutivos, devido a massa das peças ser consideravelmente maior que as peças de produção e isso pode ter ocasionado uma maior tendência no surgimento de uma separação entre as camadas de impressão. A geometria das peças com variação significativa de volume pode ocasionar melhor desempenho no debinding. O surgimento de trincas no processo de sinterização pode ter sido causado por regiões geometricamente distintas como áreas compactas e vazadas (furos, rebaxos, etc).
- Os defeitos no componente lado fixo e móvel de separação de camadas e as trincas apresentadas próximo do alojamento da bucha de injeção inviabilizaram a utilização dos circuitos de água, projetados com o objetivo de comparar a eficiência de troca térmica entre processos (FDM x usinagem), devido a falta de isolamento entre água e gases com a massa fundida. Essa mistura provocaria defeitos na peça que comprometeriam a qualidade superficial do componente e perdas consideráveis nas propriedades mecânicas dos componentes injetados. Uma possível solução seria eliminar algumas geometrias dos componentes impressos, deixando-os mais uniformes, sem variações

bruscas de massa e prover uma sinterização com massa mais uniforme, distribuindo melhor as tensões geradas pelo aquecimento e resfriamento da geometria.

- Durante a impressão do componente não houve uma deformação em relação à aderência entre base do componente e mesa de impressão. A cola com especificação para materiais com metal na composição atendeu corretamente às expectativas e inclusive provocou alguns problemas de falta de material na base devido ao alto grau de adesão, o que pode ter prejudicado o componente em relação ao dimensional e as deformações apresentadas na base pós sinterização.
- As medições mostraram que, apesar de termos condições estáveis de contração e desvios leves em relação às cotas teóricas, existe uma variação entre os fatores de contração teóricos, apresentados em catálogo, e os apresentados no experimento. Em um caso de aplicação prática não significa sucesso ou fracasso e sim algo a ser compreendido e considerado como variável para um controle onde, para peças com tolerâncias maiores não precisarão de qualificação e peças com amplitudes menores na tolerância existe uma forte tendência de qualificação posterior por um processo de usinagem convencional (fresamento, retífica, torneamento, entre outros).
- As restrições dimensionais dos componentes impressos estão muito associadas à precisão da impressora 3D e ao processo de sinterização. Uma análise detalhada é necessária para prever possíveis deformações de geometria, desvios de forma e variações maiores que as aceitáveis para a montagem em porta molde para injeção polimérica. Porém, a usinagem de calibração se mostrou eficiente e pode ser uma alternativa para viabilizar a correção dos pontos que não atendem às especificações. Essas operações asseguraram um padrão de acabamento superficial muito semelhante à usinagem a partir de um bloco de aço bruto.
- O acabamento dos componentes fabricados por extrusão 3D e usinados a partir de bloco bruto apresentaram diferenças significativas entre os processos. Para os componentes obtidos por impressão 3D, a superfície

de contato com o produto injetado apresentou uma textura, originada pela deposição entre camadas da impressão, o que não ocorreu no usinado, visto que a qualidade da superfície foi definida pelo padrão de acabamento definido na usinagem. Esse acabamento texturizado, de rugosidade definida no processo de extrusão, em muitos casos pode acarretar em problema na extração da peça injetada após as etapas de injeção e resfriamento na injetora, devido ao aumento da aderência entre a massa fundida e a parede do molde, diferentemente da superfície usinada, onde a usinagem permite um controle maior da rugosidade, redução da aderência e conseqüente facilidade na extração. Certamente o mesmo padrão de acabamento pode ser empregado ao postigo impresso, porém mais horas de trabalho precisariam ser alocadas ao componente, aplicando estratégias de acabamento na usinagem CNC, retirando a camada texturizada. Porém, essa camada de remoção precisa ser prevista no projeto, antes da extrusão.

- Em comparação entre processo de fabricação entre impressão por FDM e processo de usinagem a partir do bloco bruto, temos cenários muito distintos, tendo vantagem e desvantagem para ambos. O processo de impressão por FDM tem uma desvantagem na comparação, devido ao maior custo de fabricação. Por ser um material novo no mercado, poucos fabricantes dispõem de filamentos com a característica necessária para sinterização, que possa ser usinado e utilizado em um sistema de molde para injeção polimérica, onde a pressão de injeção, fatores de desgaste como abrasão, adesão e a alta temperatura da massa fundida são bem comuns. Já no prazo de fabricação, o processo de impressão por FDM leva vantagem, sendo que a compra do material bruto para ser usinado é um processo longo e pode inviabilizar projetos onde se tenha um espaço curto de tempo entre a aprovação do produto e a entrega da peça injetada para o cliente. Nesse caso, se o critério de escolha não foi preço e sim prazo, o processo de impressão tem grande vantagem competitiva.
- O comportamento do conjunto de componentes impressos foi muito similar ao conjunto usinado. O fator de textura gerado no conjunto

impresso pelo processo de impressão FDM foi algo que dificultou a injeção, tanto no preenchimento quanto na retenção do produto injetado durante a abertura da injetora. Isso não ocorreu no conjunto usinado pois, através do processo de usinagem convencional houve um controle nos parâmetros de usinagem que permitiram garantir ao produto injetado uma qualidade superficial suficiente para a extração. Embora ambos falhar no primeiro teste, em função das espessuras finas, o conjunto impresso precisou de uma maior energia para o preenchimento da cavidade, o que levou o não funcionamento do conjunto e a interrupção do teste. Este comportamento se deu em função de fatores dimensionais não atendidos pelo processo de impressão, onde as espessuras ficaram ainda menores que o projetado e a rugosidade das paredes dificultaram o fluxo do material.

- É possível afirmar que o conjunto desenvolvido pelo processo de manufatura aditiva apresentou resultados similares ao conjunto usinado a partir de um bloco bruto, onde o conjunto se mostrou estável, sem deformações após os ciclos, sendo que foi aplicada uma carga de oitenta toneladas de compressão (fechamento do molde na máquina injetora) e uma pressão de injeção de 12 MPa por aproximadamente trezentas vezes. Não foi possível testar a refrigeração devido às trincas, o que elevou o tempo de resfriamento da massa fundida, porém a produção de cinco horas ininterruptas na injetora nos permite prever um panorama muito positivo para lotes maiores que os ensaiados.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, é possível citar:

- Avaliar a possibilidade de projetar cavidades com alívio de massa, utilizando como estrutura uma espessura constante nas paredes do bloco e no perfil do produto, motivando a redução de material utilizado, tempo de impressão e conseqüente redução de custo, além de benefícios de um controle térmico mais homogêneo.
- Desenvolver cavidades com o Ultrafuse 316L e submeter ao processo de nitretação para avaliar o comportamento e a viabilidade de ser uma alternativa no desenvolvimento de moldes para o processo de injeção.
- Avaliar a aplicação do processo de nitretação a plasma em cavidades produzidas pelo processo MAM por sinterização.
- Avaliar a aplicação da otimização topológica e simulações computacionais para o projeto das cavidades do molde, visando a máxima redução de massa dentro dos limites de resistência mecânica necessários para a aplicação.
- Estudar e aplicar ao modelo, utilizando a simulação computacional, tipos de refrigeração otimizados (*conformal cooling*), com o objetivo de romper paradigmas na aplicação de cavidades desenvolvidas em MAM e suas vantagens na redução de tempo de ciclo de injeção.

7. REFERÊNCIAS

7.1 REFERÊNCIAS NOMINAIS

CHUNG, Chen-Yuan; TZENG, Yu-Chih. Effects of aging treatment on the precipitation behavior of ϵ -Cu phase and mechanical properties of metal injection molding 17-4PH stainless steel. **Materials Letters**, Percentil Scopus: 87%, v. 237, p. 228-231, 2019.

FRAZIER, William E. Metal additive manufacturing: a review. **Journal of Materials Engineering and Performance**, Percentil Scopus: 61%, v. 23, n. 6, p. 1917-1928, 2014.

IRRINKI, Harish et al. Effects of powder attributes and laser powder bed fusion (L-PBF) process conditions on the densification and mechanical properties of 17-4 PH stainless steel. **Jom**, Percentil Scopus: 79% v. 68, p. 860-868, 2016.

KEDZIORA, Slawomir et al. Strength Properties of 316L and 17-4 PH **Stainless Steel Produced with Additive Manufacturing. Materials**, Percentil Scopus: 94% v. 15, n. 18, p. 6278, 2022.

KOROTCHENKO, A. et al. Use of additive technologies for metal injection molding. **Engineering Solid Mechanics**, Percentil Scopus: 78%, v. 8, n. 2, p. 143-150, 2020.

MARIN, Felipe et al. A new hybrid process combining machining and selective laser melting to manufacture an advanced concept of conformal cooling channels for plastic injection molds. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Percentil Scopus: 83%, v. 113, n. 5, p. 1561-1576, 2021.

MEDEIROS, Jorge Luis Braz. Desenvolvimento e análise da influência da oxinitrocarbonetação e acabamento intermediário nas propriedades metalúrgicas e mecânicas de aços inoxidáveis MIM. 2015. Tese de Doutorado em Engenharia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2015.

NGO, Tuan D. et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. **Composites Part B: Engineering**, Percentil Scopus: 97%, v. 143, p. 172-196, 2018.

QIU, Chunlei et al. On the role of melt flow into the surface structure and porosity development during selective laser melting. **Acta Materialia**, Percentil Scopus: 97% v. 96, p. 72-79, 2015.

RAJPUROHIT, Shilpesh R.; DAVE, Harshit K. Analysis of tensile strength of a

fused filament fabricated PLA part using an open-source 3D printer. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Percentil Scopus: 84% v. 101, n. 5, p. 1525-1536, 2019.

RASHID, Rahman et al. Effect of scan strategy on density and metallurgical properties of 17-4PH parts printed by Selective Laser Melting (SLM). **Journal of Materials Processing Technology**, Percentil Scopus: 94%, v. 249, p. 502-511, 2017.

SEIFI, Mohsen et al. Overview of materials qualification needs for metal additive manufacturing. **Jom**, Percentil Scopus: 79% v. 68, n. 3, p. 747-764, 2016.

SING, Swee Leong et al. Laser and electron-beam powder-bed additive manufacturing of metallic implants: A review on processes, materials and designs. **Journal of Orthopaedic Research**, Percentil Scopus: 90%, v. 34, n. 3, p. 369-385, 2016.

SINGH, Gurminder et al. Additive manufacturing of 17–4 PH steel using metal injection molding feedstock: Analysis of 3D extrusion printing, debinding and sintering. **Additive Manufacturing**, Percentil Scopus: 97% v. 47, p. 102287, 2021.

SUBASI, Mehmet. The investigation of sintering temperature and Ni interlayer effects on diffusion bonding in inserted metal injection molding. **Journal of Manufacturing Processes**, Percentil Scopus: 87%, v. 58, p. 706-711, 2020.

TAN, Chaolin et al. Design and additive manufacturing of novel conformal cooling molds. **Materials & Design**, Percentil Scopus: 97%, v. 196, p. 109147, 2020.

TOFAIL, Syed AM et al. Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. **Materials Today**, Percentil Scopus: 99%, v. 21, n. 1, p. 22-37, 2018.

TOSTO, Claudio et al. Hybrid metal/polymer filaments for fused filament fabrication (FFF) to print metal parts. **Applied Sciences**, Percentil Scopus 73% v. 11, n. 4, p. 1444, 2021.

VYAVAHARE, Swapnil et al. Fused deposition modelling: A review. **Rapid Prototyping Journal**, Percentil Scopus: 85%, 2020.

WAALKES, Lennart et al. Feasibility study on piston-based feedstock fabrication with Ti-6Al-4V metal injection molding feedstock. **Additive Manufacturing**, Percentil Scopus: 95%, v. 35, p. 101207, 2020.

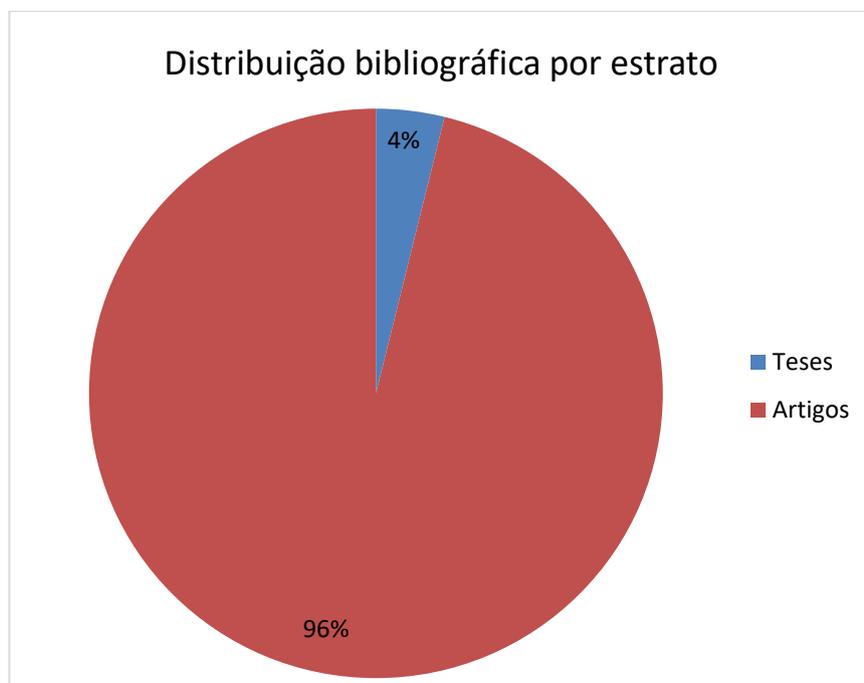
YADOLLAHI, Aref et al. Data demonstrating the effects of build orientation and heat treatment on fatigue behavior of selective laser melted 17–4 PH stainless steel. **Data in brief**, Percentil Scopus: 72% v. 7, p. 89-92, 2016.

YASA, Evren; KRUTH, Jean-Pierre. Application of laser re-melting on selective laser melting parts. **Advances in Production engineering and Management**, v. 6, n. 4, p. 259-270, 2011.

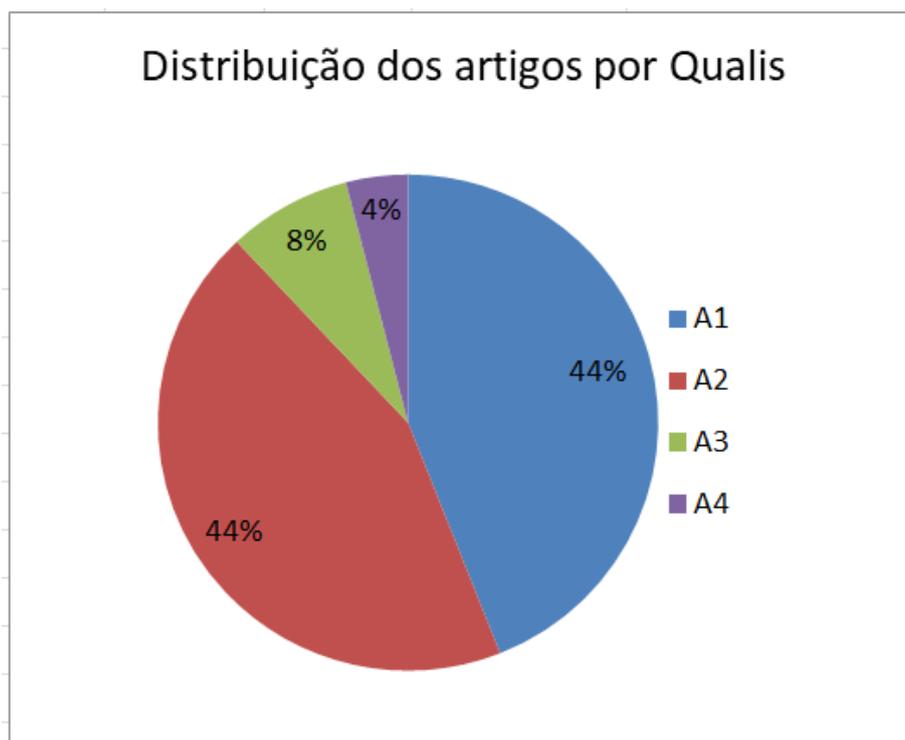
ZABALA, B. et al. Mechanism-based wear models for plastic injection moulds. **Wear**, Percentil Scopus: 87%, v. 440, p. 203105, 2019.

ZEGARD, Tomás; PAULINO, Glaucio H. Bridging topology optimization and additive manufacturing. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Percentil Scopus: 91% v. 53, n. 1, p. 175-192, 2016.

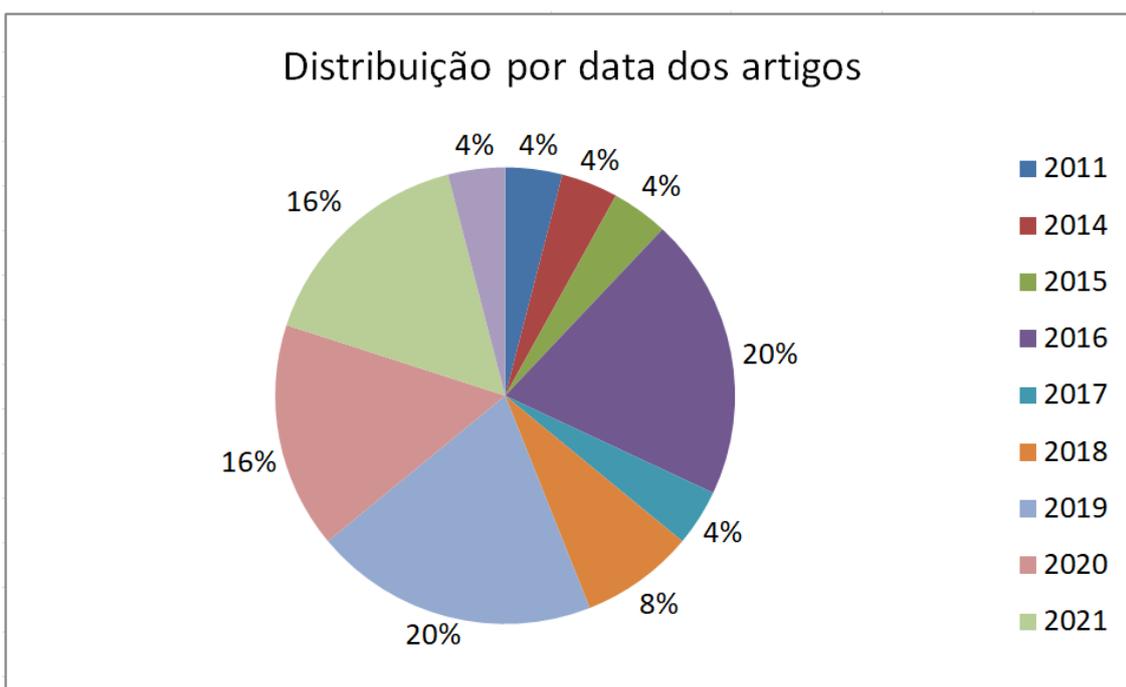
7.2 REFERÊNCIAS POR ESTRATO



7.3 REFERÊNCIAS POR QUALIS



7.4 REFERÊNCIAS POR DATA DOS ARTIGOS



8. ANEXOS

ANEXO I - Filamento Ultrafuse 17-4PH



FORWARD AM
Innovating Additive Manufacturing



BASF
We create chemistry

Technical Data Sheet

Ultrafuse 17-4 PH

Date / Revised: 02.07.2021
Version No.: 1.1

General information

Components

17-4 PH stainless steel composite filament for Fused Filament Fabrication.

Product Description

Ultrafuse® 17-4 PH is a filament for the production of metal components in 17-4 stainless steel on standard Fused Filament Fabrication (FFF) printers. This stainless steel can be fully heat treated to high levels of strength and hardness. It is therefore ideal for Petrochemistry, Aerospace, the Automotive and the Medical Industry. Parts printed with our metal-polymer composite filament Ultrafuse® 17-4 PH obtain their final properties through a catalytic debinding and sintering process known from traditional Metal Injection Molding.

Delivery form and warehousing

Ultrafuse® 17-4 PH filament should be stored at 15 - 25°C in its originally sealed package in a clean and dry environment. If the recommended storage conditions are observed the products will have a minimum shelf life of 12 months.

Product safety

Recommended: Process materials in a well ventilated room, or use professional extraction systems. For further and more detailed information please consult the corresponding material safety data sheets.

For your information

Standards: DIN 1.4542, X 5 CrNiCuNb 17 4, AISI/UNS S17400 ; SAE J 467 (17-4PH)

Notice

The data contained in this publication are based on our current knowledge and experience. In view of the many factors that may affect processing and application of our product, these data do not relieve processors from carrying out their own investigations and tests; neither do these data imply any guarantee of certain properties, nor the suitability of the product for a specific purpose. Any descriptions, drawings, photographs, data, proportions, weights etc. given herein may change without prior information and do not constitute the agreed contractual quality of the product. It is the responsibility of the recipient of our products to ensure that any proprietary rights and existing laws and legislation are observed.

The safety data given in this publication is for information purposes only and does not constitute a legally binding Material Safety Data Sheet (MSDS). The relevant MSDS can be obtained upon request from your supplier or you may contact BASF 3D Printing Solutions GmbH directly at sales@basf-3dps.com.

BASF 3D Printing Solutions BV
sales@basf-3dps.com
www.forward-am.com

Technical Data Sheet for Ultrafuse 17-4 PH

Version No. 1.1

Recommended 3D-Print processing parameters

Nozzle Temperature	230 – 250 °C / 446 – 482 °F
Build Chamber Temperature	-
Bed Temperature	90 – 120 °C / 194 – 248 °F
Bed Material	Glass + approved glues* / polyimide tape (*Magigoo® or Dimafix® suggested)
Nozzle Diameter	≥ 0.4 mm
Print Speed	15 - 50 mm/s

Drying Recommendations

Drying recommendations to ensure printability	17-4 PH is in a printable condition, drying is not necessary
---	--

General Properties

Standard

Sintered Part Density	7600 kg/m ³ / 474.5 lb/ft ³	ISO 1183-1
-----------------------	---	------------

Filament Properties

Filament Diameter	1.75 mm	2.85 mm
Tolerance	±0.050 mm	±0.075 mm
Roundness	±0.050 mm	±0.075 mm
Bending Radius	5 ± 1 mm	10 ± 3 mm
Length per Spool	250 m	95 m
Weight per Spool	3 kg	3 kg

Technical Data Sheet for Ultrafuse 17-4 PH

Version No. 1.1

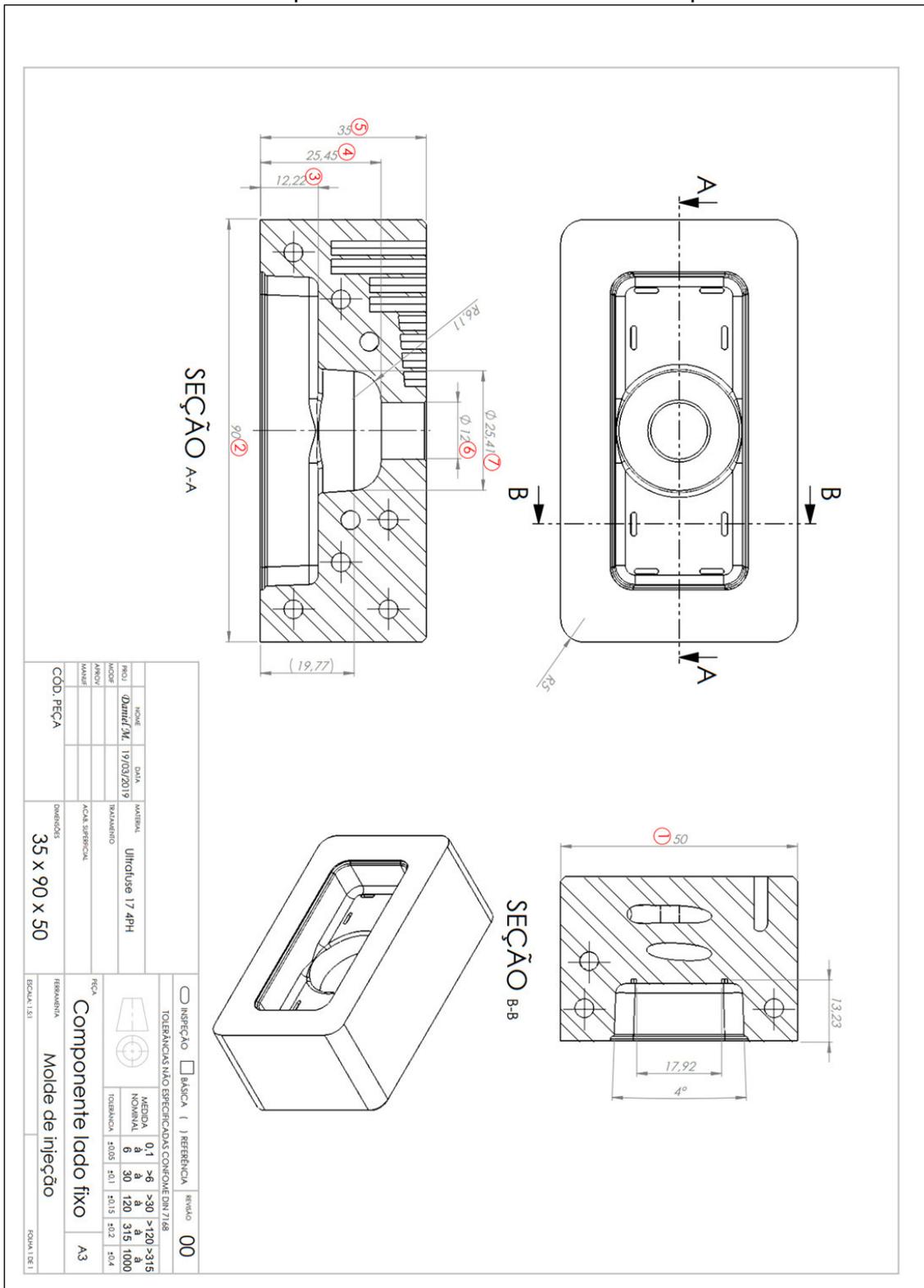
Mechanical Properties | sintered

Print direction	Standard	XY	ZK
		Flat	Upright
Tensile strength	ISO 6892-1 ¹	760 MPa / 110.2 ksi	730 MPa / 105.9 ksi
Elongation at Break	ISO 6892-1 ¹	4 %	3 %
Yield Strength, R _{0.2}	ISO 6892-1 ¹	680 MPa / 98.6 ksi	700 MPa / 101.5 ksi
Vickers Hardness	ISO 6507-1	257 HV10 352 HV 10 ²	-

¹Specimen shape Form E261c20 according to DIN 50125
²Heat treated H950

Fonte: BASF

ANEXO II - Desenho para relatório dimensional do componente lado fixo



Fonte: Próprio autor

ANEXO IV - Relatório dimensional das peças verde

RELATÓRIO DIMENSIONAL - LADO MÓVEL - VERDE

COTA	DIMENSÃO	MEDIDAS (mm)					MÍNIMO	DIFERENÇA	MÁXIMO	DIFERENÇA	MÉDIA	DIFERENÇA	DESVIO	DIFERENÇA	EXO
		A	B	C	D	E									
1.1	3,000	2,822	2,718	2,798		2,718	-0,282	2,822	-0,178	2,779	-0,221	0,1190	7,356%	DIAMETRO 1	
1.2	3,000	2,416	2,434	2,581		2,416	-0,584	2,581	-0,419	2,477	-0,523	0,2717	17,433%	DIAMETRO 2	
1.3	3,000	2,817	2,933	2,765		2,765	-0,235	2,933	-0,067	2,838	-0,162	0,1071	5,389%	DIAMETRO 3	
1.4	3,000	2,589	2,638	2,759		2,589	-0,411	2,759	-0,241	2,662	-0,338	0,1835	11,267%	DIAMETRO 4	
1.5	3,000	2,710	2,840	2,814		2,710	-0,290	2,840	-0,160	2,788	-0,212	0,1200	7,067%	DIAMETRO 5	
1.6	3,000	2,828	2,879	2,814		2,819	-0,181	2,879	-0,130	2,839	-0,161	0,0835	5,367%	DIAMETRO 6	
2	6,000	5,736	5,613	5,589	5,795	5,589	-0,411	5,795	-0,205	5,703	-0,297	0,1653	4,950%	DIAMETRO 7	
3	34,230	33,309	33,343	33,346	33,330	33,349	-0,921	33,349	-0,921	33,335	-0,895	0,0109	2,615%	EXO Z	
4	32,000	31,802	31,824	31,848	31,849	31,802	-0,198	31,849	-0,151	31,832	-0,168	0,0195	0,526%	EXO Y	
5	70,000	69,386	69,454	69,383	69,453	69,374	-0,626	69,454	-0,546	69,410	-0,590	0,0400	0,843%	EXO X	
6	13,240	12,988	12,966	12,921	12,941	12,961	-0,319	12,988	-0,252	12,955	-0,285	0,0255	2,150%	EXO Z	
7	24,230	23,743	23,787	23,768	23,760	23,724	-0,506	23,787	-0,443	23,756	-0,474	0,0240	1,955%	EXO Z	

RELATÓRIO DIMENSIONAL - LADO MÓVEL - SINTERIZADO

COTA	ONTRAÇA DIMENSÃO ESPECIFICADA	MEDIDAS (mm)					MÍNIMO (MM)	DIFERENÇA MÍNIMO	MÁXIMO (MM)	DIFERENÇA MÁXIMO	MÉDIA (MM)	DIFERENÇA MÉDIA	DIFERENÇA % DIFERENÇA NOMINAL	DESVIO PADRÃO	CONTRAÇÃO MÉDIA	DIFERENÇA CONTRAÇÃO	EIXO IMPRESSÃO
		A	B	C	D	E											
1.1	16,50%	2,321	2,265	2,213	2,321		2,213	-0,108	2,321	0,000	2,266	-0,054	0,0518	18,458%	1,958%	DIAMETRO 1	
1.2	16,50%	2,068	2,301	2,384	2,386		2,301	0,233	2,386	0,318	2,357	0,289	0,1497	4,845%	-11,655%	DIAMETRO 2	
1.3	16,50%	2,370	2,354	2,359	2,298		2,298	-0,072	2,359	-0,011	2,337	-0,033	0,0322	17,663%	1,163%	DIAMETRO 3	
1.4	16,50%	2,223	2,490	2,467	2,424		2,424	0,201	2,490	0,267	2,460	0,238	0,1219	7,576%	-8,924%	DIAMETRO 4	
1.5	16,50%	2,328	2,301	2,345	2,300		2,300	-0,028	2,345	0,017	2,315	-0,013	0,0219	16,954%	0,454%	DIAMETRO 5	
1.6	16,50%	2,371	2,502	2,677	2,444		2,444	0,073	2,677	0,306	2,541	0,170	0,1307	10,497%	-6,003%	DIAMETRO 6	
2	16,50%	4,762	4,550	4,791	4,760	4,542	4,542	-0,220	4,792	0,060	4,693	-0,069	0,1075	17,710%	1,210%	DIAMETRO 7	
3	20,70%	26,435	26,509	26,539	26,509	26,510	0,000	-26,435	0,000	26,537	-0,043	0,0474	18,692%	16,634%	EXO Y		
4	16,50%	26,580	26,509	26,539	26,509	26,519	-0,071	26,618	0,038	26,557	-0,043	0,0494	16,086%	-0,414%	EXO Y		
5	16,50%	57,957	58,356	58,215	58,271	58,164	58,164	0,207	58,356	0,399	58,245	0,099	0,0499	19,891%	-0,809%	EXO X	
COTA 6	20,70%	10,274	10,386	10,397	10,373	10,337	10,337	0,063	10,399	0,125	10,378	0,105	0,0499	19,891%	-0,809%	EXO Z	
COTA 7	20,70%	18,859	18,951	19,002	18,940	19,120	18,940	0,101	19,120	0,281	19,015	0,177	0,1025	19,957%	-0,745%	EXO Z	

RELATÓRIO DIMENSIONAL - LADO FIXO - VERDE

COTA	DIMENSÃO ESPECIFICADA	MEDIDAS (mm)					MÍNIMO	DIFERENÇA MÍNIMO	MÁXIMO (mm)	DIFERENÇA MÁXIMO	MÉDIA (mm)	DIFERENÇA MÉDIA	DIFERENÇA % DIFERENÇA NOMINAL	DESVIO PADRÃO	CONTRAÇÃO MÉDIA	DIFERENÇA CONTRAÇÃO	EIXO IMPRESSÃO
		A	B	C	D	E											
1	50,000	49,823	49,820	49,847	49,823	49,819	-0,181	49,847	-0,163	49,826	-0,174	0,327%	0,017	1,958%	EXO Y		
2	90,000	89,524	89,539	89,593	89,513	89,513	-0,487	89,597	-0,403	89,553	-0,447	0,472%	0,0383	1,958%	EXO Y		
3	12,220	11,956	11,933	11,798	11,889	11,798	-0,422	11,933	-0,227	11,923	-0,297	2,144%	0,0805	1,958%	EXO Z		
4	24,450	25,278	25,237	25,139	25,250	25,214	0,689	25,278	0,888	25,224	0,774	-3,275%	0,0526	1,958%	EXO Z		
5	35,000	34,296	34,008	34,103	34,019	34,050	-0,992	34,296	-0,705	34,095	-0,905	-2,300%	0,1127	1,958%	EXO Z		
6	12,000	11,752	11,697	11,753	11,733	11,697	-0,303	11,753	-0,237	11,739	-0,261	2,073%	0,0280	1,958%	EXO Z		
7	25,410	24,973	24,976	24,988	24,991	24,008	-1,402	24,991	-0,419	24,787	-0,623	2,090%	0,4387	1,958%	EXO Z		

RELATÓRIO DIMENSIONAL - LADO FIXO - SINTERIZADO

COTA	CONTRAÇÃO ESPECIFICADA	MEDIDAS (mm)					MÍNIMO	DIFERENÇA MÍNIMO	MÁXIMO (mm)	DIFERENÇA MÁXIMO	MÉDIA (mm)	DIFERENÇA MÉDIA	DIFERENÇA % DIFERENÇA NOMINAL	DESVIO PADRÃO	CONTRAÇÃO MÉDIA	DIFERENÇA CONTRAÇÃO	EIXO IMPRESSÃO
		A	B	C	D	E											
1	16,50%	41,605	41,812	41,523	41,689	41,599	-0,082	41,812	0,207	41,649	0,044	16,41%	0,065	16,41%	-0,088%	EXO Y	
2	16,50%	74,777	75,471	75,280	75,316	75,365	0,593	75,471	0,694	75,372	0,595	15,94%	0,0780	15,94%	-0,099%	EXO Z	
COTA 3	20,70%	9,455	9,471	9,415	9,436	9,481	-0,040	9,431	0,076	9,467	0,012	20,50%	0,0446	20,50%	-0,099%	EXO Z	
COTA 4	20,70%	20,002	20,101	20,100	20,025	20,134	0,023	20,134	0,132	20,082	0,090	20,34%	0,0402	20,34%	-0,395%	EXO Z	
COTA 5	20,70%	27,037	27,338	27,265	27,457	27,387	0,266	27,457	0,420	27,338	0,301	19,82%	0,0879	19,82%	-0,822%	EXO Z	
6	16,50%	9,802	10,252	10,298	10,286	10,188	0,396	10,257	0,569	10,287	0,487	12,28%	0,071	12,28%	-4,27%	EXO Z	
7	16,50%	20,697	21,345	21,352	21,349	21,322	0,625	21,367	0,670	21,347	0,650	13,88%	0,063	13,88%	-2,82%	EXO Z	

Fonte: Próprio autor