

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU

RENAN CESAR MASSA

AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DIMENSIONAL DE
FERRAMENTAS DE HIDROCONFORMAÇÃO FABRICADAS
POR MANUFATURA ADITIVA

BAURU – 2022

RENAN CESAR MASSA

**AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DIMENSIONAL DE
FERRAMENTAS DE HIDROCONFORMAÇÃO FABRICADAS
POR MANUFATURA ADITIVA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Bauru da Universidade Júlio Mesquita Filho - UNESP, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Cesar Renato Foschini.

Massa, Renan Cesar.

Avaliação da estabilidade dimensional de
ferramentas de hidroconformação fabricadas por
manufatura aditiva / Renan Cesar Massa, 2022
93 f. : il.

Orientador: Cesar Renato Foschini

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual
Paulista (Unesp). Faculdade de Engenharia, Bauru, 2022

1. Manufatura aditiva. 2. Extrusão de material. 3.
FDM. 4. FDM. 5. Impressão 3D 6. Ferramenta de
conformação 7. PEI. I. Universidade Estadual Paulista.
Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE RENAN CESAR MASSA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 07 dias do mês de março do ano de 2022, às 09:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de RENAN CESAR MASSA, intitulada **AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DIMENSIONAL DE FERRAMENTAS DE HIDROCONFORMAÇÃO FABRICADAS POR MANUFATURA ADITIVA**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. CESAR RENATO FOSCHINI (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. CARLOS ALBERTO FORTULAN (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade de São Paulo/São Carlos. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.



Prof. Dr. CESAR RENATO FOSCHINI

À vida, à liberdade, à minha história, à minha
origem, e as oportunidades que sempre tive,
sem isso não chegaria até aqui. Aos meus pais,
Onivaldo e Solange, que sempre se esforçaram
pela educação dos filhos. À minha esposa,
Luna, pela paciência e apoio em todo período
de elaboração deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus pelo dom da vida.

Agradeço aos meus pais, Onivaldo Ap. D. Massa e Solange R. Peluzzo Massa por todo apoio na minha formação educacional e principalmente pelas orientações para minha formação como pessoa, sou quem sou, por tudo que recebi de vocês. Sou grato às minhas irmãs Renata P. Massa e Rafaela C. Massa pela nossa união em toda minha trajetória.

Agradeço imensamente à minha esposa, Luna Ghiotto, por todo amor, carinho, presença e paciência em toda nossa trajetória. Além do grande apoio e compreensão durante a realização deste trabalho.

Agradeço aos demais familiares e amigos que dê alguma forma sempre apoiaram e torceram pelo meu sucesso.

Agradeço em especial o Prof. Dr. Renato Carlos Ghiotto (in memoriam), que sempre apoiou, orientou e torceu para a conclusão deste trabalho.

Agradeço imensamente ao Prof. Dr. Cesar Renato Foschini por toda orientação, paciência, atenção, apoio e parceria no desenvolvimento deste trabalho. Parabéns pelo exemplo de pessoa.

Agradeço aos professores Dr. Eduardo Carlos Bianchi e Prof. Dr. Carlos Alberto Fortulan pela participação na banca e sugestões para melhoria do trabalho.

Agradeço aos profissionais do programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica da UNESP de Bauru, que quando necessário sempre ajudaram para resolver alguma necessidade.

Agradeço as empresas na qual trabalhei (Ambev e Embraer) e trabalho (AVENIR 3D), que sempre me proporcionaram bons momentos e experiências, que dê alguma forma apoiaram e ajudaram a somar neste trabalho.

Agradeço a CAPES pelo apoio e voto de confiança em meu trabalho no momento oportuno.

**”all
I
lov’d
I
lov’d
alone“**

(Renato Ghiotto)

RESUMO

MASSA, R. C. **Avaliação da estabilidade dimensional de ferramentas de hidroconformação fabricadas por manufatura aditiva.** 2022. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2022.

O presente trabalho avalia a estabilidade dimensional de ferramentas de hidroconformação fabricadas por Manufatura Aditiva (MA). Há evidências que a tecnologia de hidroconformação surgiu no final da década de 50, é classificado como um processo de estampagem e é bastante utilizado em setores da indústria como o setor bélico, automobilístico, aeronáutico e de fabricação de quadros de bicicleta. Este trabalho propõe substituir o processo convencional de fabricação das ferramentas de conformação, que é a partir de conceitos subtrativos de manufatura (usinagem), por um conceito de manufatura atualmente ascendente no mercado industrial, que é a Manufatura Aditiva. Entre todas as tecnologias aditivas aplicáveis e disponíveis, a que é empregada na proposta deste estudo é a tecnologia aditiva por extrusão de material, também conhecida como FDM (Modelagem por Fusão e Deposição) ou FFF (Fabricação por Filamento Fundido). Para validação da proposta é necessário que o desempenho mecânico da ferramenta fabricada por MA seja satisfatório tanto quanto o desempenho mecânico da ferramenta fabricada pelo processo convencional, logo, para esta avaliação objetiva a fabricação, simulação (MEF), medição tridimensional e ensaio de dois corpos de provas similares às ferramentas de hidroconformação. Um corpo de prova manteve as características convencionais de fabricação (processo de manufatura e material) e um segundo foi fabricado pelo conceito aditivo e material termoplástico. Em relação aos materiais utilizados para a fabricação dos corpos de prova, respectivamente para o método convencional e aditivo foram: liga de alumínio (AA 7050-T7 451) e liga polimérica (ULTEM 9085) com base no polímero termoplástico poli(éter-imida) (PEI). Características como anisotropia e porosidade também foram avaliadas e discutidas para ambos corpos de provas. Considerando as características mecânicas da liga polimérica utilizada, o corpo de prova fabricado em ULTEM 9085, após a fase de ensaios com mais de 950 ciclos a valores de carga próximos de 40 MPa, apresentou satisfatório desempenho mecânico e baixas deformações (máxima de 0.17 mm). Os valores máximos de deformação apresentados ficaram dentro da tolerância de 0.3 mm utilizada no estudo, desta forma a estabilidade dimensional do corpo de prova em ULTEM 9085 foi validada a partir do bom desempenho apresentado na fase de ensaio utilizando o processo de hidroconformação com diafragma de borracha.

Palavras chave: manufatura aditiva; extrusão de material; FDM; modelagem por fusão e deposição; FFF; fabricação por filamento fundido; impressão 3D; prototipagem rápida; ferramental rápido; processo de conformação; ferramenta de conformação; PEI; poli(éter-imida).

ABSTRACT

MASSA, R. C. **Evaluation of the dimensional stability of hydroforming tools manufactured by additive manufacturing.** 2022. 88 f. Thesis (Master's degree) - Bauru Faculty of Engineering, São Paulo State University, Bauru, 2022.

The present work evaluates the dimensional stability of hydroforming tools manufactured by Additive Manufacturing (AM). There is evidence that hydroforming technology emerged in the late 1950s, is classified as a stamping process and is widely used in industry sectors such as the military, automobile, aeronautical and bicycle frame manufacturing sectors. This work proposes to replace the conventional manufacturing process of forming tools, which is based on subtractive manufacturing concepts (machining), for a manufacturing concept currently rising in the industrial market, which is Additive Manufacturing. Among all the applicable and available additive technologies, the one used in the proposal of this study is the material extrusion based additive manufacturing, also known as FDM (Fusion and Deposition Modeling) or FFF (Fused Filament Fabrication). In order to validate the proposal, it is necessary that the mechanical performance of the tool manufactured by AM be satisfactory as much as the mechanical performance of the tool manufactured by the conventional process, so, for this objective evaluation, the fabrication, simulation (MEF), three-dimensional measurement and testing two specimens similar to hydroforming tools. One specimen kept the conventional manufacturing characteristics (manufacturing process and material) and a second one was manufactured by the additive concept and thermoplastic material. Regarding the materials used to manufacture the specimens, respectively for the conventional and additive method, they were: aluminum alloy (AA 7050-T7 451) and polymer alloy (ULTEM 9085) based on the thermoplastic polymer poly(ether-imide) (PEI). Characteristics such as anisotropy and porosity were also evaluated and discussed for both specimens. Considering the mechanical characteristics of the polymeric alloy used, the specimen manufactured in ULTEM 9085, after the testing phase with more than 950 cycles at load values close to 40 MPa, presented satisfactory mechanical performance and low deformations (maximum of 0.17 mm). The maximum values of deformation presented were within the tolerance of 0.3 mm used in the study, in this way the dimensional stability of the specimen in ULTEM 9085 was validated from the good performance presented in the test phase using the hydroforming process with rubber diaphragm.

Keywords: additive manufacturing; material extrusion; FDM; fused deposition modeling; FFF; fused filament fabrication; 3D printing; rapid prototyping; rapid tooling; forming process; forming tool; PEI; poly(ether-imide).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (a) Peça conformada (b) Sequencia da conformação no processo de Hidroconformação (adaptada)	19
Figura 2 - Vistas de uma ferramenta de policarbonato (PC) impressa em 3D e aplicada no processo de Hidroconformação com prensa hidráulica (adaptada)	21
Figura 3 - Tipos do processo de Hidroconformação	22
Figura 4 - Fases do processo de Hidroconformação de Chapa (adaptada).....	23
Figura 5- Conceito da hidroconformação com diafragma de borracha (punção rígido)	24
Figura 6 - Exemplo de peça hidroconformada com diafragma de borracha (adaptada).....	25
Figura 7 - (a) Exemplo de ferramentas de alumínio e (b) aplicação da ferramenta no processo de conformação com diafragma de borracha (adaptada).....	26
Figura 8 - Fatiamento do modelo CAD em camadas planas	30
Figura 9 - Representação das principais etapas da Prototipagem Rápida (adaptada)	31
Figura 10 - Peça impressa em 3D com material metálico (deposição de metal a laser)	33
Figura 11 - Modelo de órtese e modelos de estudos para a área médica impressos em 3D	35
Figura 12 - a) Máquina de Sinterização a Laser metálica - EOS M100, b) Peça metálica manufaturada pela EOS M100 e c) Processo de fundição do material metálico em pó depositado.....	37
Figura 13 - Visão geral dos polímeros usados pelas tecnologias aditivas e respectivas áreas de aplicação	38
Figura 14 - Esquemática: Processo aditivo por extrusão de material (adaptada).....	42
Figura 15 - Exemplo de peça impressa com tecnologia de extrusão de material e suporte (material PVA)	43
Figura 16 - Filamentos disponíveis comercialmente ou com citações já feitas em literatura científica para o processo de extrusão de material (FDM).....	44
Figura 17 - Peça aeronáutica conformada por Hidroconformação de Chapas com ferramenta fabricada por Impressão 3D – tecnologia por extrusão de material	46
Figura 18 - Ferramenta de conformação impressa com ULTEM 9085 e tecnologia por extrusão de material: (a) ferramenta + peça conformada, (b) ferramenta + blank, (c) blank do produto (adaptada).....	46
Figura 19 - Postiço de molde de injeção impresso com PEEK e tecnologia por extrusão de material: (a) projeto e molde impresso em 3D e (b) molde com parte impressa montados na máquina injetora (adaptada)	47
Figura 20 - Orientações de impressão para o processo por extrusão de material (adaptada)...	48
Figura 21- Aplicação de carga x direção das camadas (adaptada)	49
Figura 22 - Extrusão de material: (a) porcentagens e (b) alguns tipos de preenchimento (adaptada)	50
Figura 23 - Diagrama Tensão x Deformação da liga AA 7050-T7 451	54
Figura 24 - Diagrama Tensão x Deformação do ULTEM 9085 (adaptada).....	56
Figura 25 - Planejamento do estudo	57
Figura 26 - Modelo 3D das ferramentas de prova	58
Figura 27 – Características de controle e respectivas regiões medidas nas ferramentas de prova	61
Figura 28 - Prensa com diafragma de borracha similar a empregada na execução dos ensaios	62
Figura 29 – Ferramentas de prova do estudo.....	65
Figura 30 - Execução da medição da FERRAMENTA II antes da fase de ensaio.....	66
Figura 31 - Propriedades físicas e mecânicas do AA 7050-T7 451 inseridas no Fusion 360 ..	70

Figura 32 - Cálculo da massa teórica (mt) da FERRAMENTA I	70
Figura 33 - Propriedades físicas e mecânicas do ULTEM 9085 inseridas no Fusion 360	71
Figura 34 - Cálculo da massa teórica (mt) da FERRAMENTA II	71
Figura 35 - Massa real (mr) para a FERRAMENTA I	72
Figura 36 - Massa real (mr) para a FERRAMENTA II	72
Figura 37 - Carregamento virtual definido para ambas análises estáticas	74
Figura 38 - Condição de restrição definida para ambas análises estáticas	74
Figura 39 - Malha definida para as simulações estáticas	75
Figura 40 - Deformação: Simulação estática para a FERRAMENTA I	76
Figura 41 - Deformação: Simulação estática para a FERRAMENTA II	76
Figura 42 - Comparação de deformações para a FERRAMENTA II: Experimental e Simulação	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas da poli(éter-imida)	29
Tabela 2 - Classificação e variações dos processos aditivos com os respectivos tipos de materiais (adaptada).....	40
Tabela 3 - Características de cada categoria das tecnologias aditivas (adaptada).....	41
Tabela 4 - Lista de termoplásticos utilizados na MA por extrusão de material e respectivas propriedades mecânicas (adaptada).....	45
Tabela 5 - Características físicas e mecânicas da liga AA 7050-T7 451	55
Tabela 6 - Características físicas e mecânicas da liga ULTEM 9085	56
Tabela 7 - Características dos corpos de prova: descrição, manufatura e material	58
Tabela 8 - Parâmetros utilizados no processo de impressão 3D para a FERRAMENTA II	59
Tabela 9 - Características de controle no processo de medição tridimensional	60
Tabela 10 - Quantidade de medições tridimensionais realizadas no estudo.....	60
Tabela 11 - Resultados das medições das ferramentas antes dos ensaios	66
Tabela 12 - Formulário de teste preenchido para a FERRAMENTA I.....	67
Tabela 13 - Formulário de teste preenchido para a FERRAMENTA II.....	68
Tabela 14 - Resultados das medições das ferramentas antes e depois dos ensaios	69
Tabela 15 - Massas reais para ambas as ferramentas de prova	73
Tabela 16 - Cálculo e resultados das porosidades para ambas ferramentas de prova	73
Tabela 17 - Valores das deformações para a FERRAMENTA I: Experimental e Simulação .	78
Tabela 18 - Valores das deformações para a FERRAMENTA II: Experimental e Simulação	79
Tabela 19 - Valores das deformações na fase experimental: FERRAMENTA I e FERRAMENTA II	80

LISTA DE ABREVIATURAS

MA – Manufatura Aditiva

FDM – Modelagem por Fusão e Deposição

FFF – Fabricação por Filamento Fundido

AA – Associação do Alumínio

PEI – Poli(éter-imida)

3D – Tridimensional

PR – Prototipagem Rápida

CAD – Designer ou Desenvolvimento 3D Auxiliado por Computador

FR – Ferramental Rápido

IoT – Internet das coisas

IoS – Internet dos sistemas

MEF – Método de Elementos Finitos.

SLA – Estereolitografia

SLS – Sinterização Seletiva a Laser

GD&T – Dimensionamento Geométrico e Toleranciamento

SAE – Sociedade de Engenheiros Automotivos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. OBJETIVO	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1. Processo de Hidroconformação	19
2.1.1. Visão geral do processo de Hidroconformação	19
2.1.2. Classificação dos processos de Hidroconformação	22
2.1.3. Hidroconformação de Chapa	22
2.1.3.1. Hidroconformação com Diafragma de Borracha (punção rígido)	23
2.1.3.2. Ferramenta para Hidroconformação com Diafragma de Borracha	25
2.2. Ligas de Alumínio	26
2.3. Poli(éter-imida) - PEI.....	28
2.4. Manufatura Aditiva - IMPRESSÃO 3D	29
2.4.1. Tecnologia por extrusão de material baseado na MA	41
2.4.2. Anisotropia	47
2.4.3. Porosidade	49
2.5. Métodos de Elementos Finitos (MEF).....	50
2.6. Medição Tridimensional	51
3. MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.1. Materiais	53
3.1.1. Liga AA 7050-T7 451	53
3.1.2. ULTEM 9085	55
3.2. Método	57
3.2.1. Planejamento do estudo	57
3.2.2. Preparação das ferramentas de prova	57
3.2.3. Medição tridimensional das ferramentas de prova	59
3.2.4. Ensaio: FERRAMENTA I e FERRAMENTA II.....	61
3.2.5. Análise de porosidade: FERRAMENTA I e FERRAMENTA II.....	62
3.2.6. MEF: FERRAMENTA I e FERRAMENTA II (Carga Estática).....	63
4. RESULTADOS	65
4.1. FERRAMENTA I e FERRAMENTA II	65
4.2. Medição Tridimensional - Antes do Ensaio	65
4.3. Ensaio	67
4.4. Medição Tridimensional - Antes e Depois do Ensaio	68
4.5. Porosidade – FERRAMENTA I e FERRAMENTA II.....	69
4.6. Simulação Estática (MEF) - FERRAMENTA I e FERRAMENTA II.....	73

5. DISCUSSÕES.....	77
6. CONCLUSÃO	83
6.1. Trabalhos futuros	84
REFERÊNCIAS	85

1. INTRODUÇÃO

A partir das três últimas décadas a sociedade vem passando por uma profunda transição e acelerada busca por novos conhecimentos, acarretando mudanças culturais e tecnológicas em todos os sentidos e aspectos. Esta evolução está acontecendo em vários níveis, momentos e setores da sociedade, seja ela no dia a dia das pessoas e empresas, no cuidado com o meio ambiente, nas universidades, nos processos industriais, na medicina, na agricultura, entre outras áreas. [1, 2]

A busca pela evolução gera dinamismo e troca entre os diversos ecossistemas, seja de forma local, regional ou mundial, que por sua vez traz novas descobertas, mudanças e quebra de paradigmas. As causas dessas mudanças na maioria das vezes surgem das necessidades apresentadas pelo próprio meio e seus variados mercados, gerando consequentemente avanços sociais, científicos, tecnológicos e industriais. [3]

Para o setor industrial a busca por mudanças, integração de processos, conectividade e tecnologias mais ágeis é sempre contínua, almejando cada vez mais o desenvolvimento de condutas eficientes, inovadoras e que tragam reduções de custos. [4, 5]. Novos conceitos de tecnologia de manufatura buscam somar-se às necessidades e preencher lacunas de setores industriais, desta forma, neste trabalho como tema principal será abordado de forma geral sobre a Manufatura Aditiva (MA), suas aplicações e respectivos processos, que serão o foco principal da revisão bibliográfica desta dissertação. De forma específica será abordado o uso da MA para fabricar ferramentas de estampagem utilizadas no processo de conformação conhecido como Hidroconformação de Chapas.

A MA, popularmente conhecida também como Impressão 3D, é um novo conceito de fabricação que traz em sua essência agilidade, redução de custo, liberdade de geometria na fabricação e inovação, tornando assim um conceito assertivo e rápido para uso no processo de desenvolvimento, prototipagem e manufatura de produto, sendo uma poderosa técnica dentro do conceito de Prototipagem Rápida (PR) [6, 7]. É importante esclarecer que a PR é a fabricação rápida de uma peça física, modelo ou montagem, apoiada pelo desenvolvimento 3D auxiliado por computador (CAD). A PR inclui uma variedade de tecnologias de fabricação, embora a MA seja o conceito de processo mais utilizado, outros processos convencionais também são utilizados para criar protótipos, tais como usinagem, fundição, moldagem e extrusão [8]. Alguns autores classificam a PR como um processo evolucionário, pois não tange apenas a manufatura propriamente dita, este processo combina as tarefas tecnológicas, metodológicas,

organizacionais em uma única estrutura com início na concepção do produto e fim na manufatura [6].

A MA está em constante evolução permitindo não somente confeccionar protótipos, peças e componentes para uso final, mas também fabricar de forma mais ágil matrizes, moldes, entre outras ferramentas, seja para uso na fase de protótipo ou série de um produto. Quando utilizado das tecnologias aditivas para fabricar moldes, ferramentas, dispositivos ou outros que não seja um produto ou protótipo, o termo empregado é Ferramental Rápido (FR) [4]. Este termo é bastante difundido nos EUA e Europa, já no Brasil o mesmo não é muito empregado, porém o conceito é bastante aplicado. Considerando a proposta deste trabalho que é utilizar de tecnologia aditiva para manufaturar ferramentas de conformação, será tratado aqui também sobre o conceito de Ferramental Rápido.

Vários são os setores que se beneficiam da Prototipagem Rápida e do Ferramental Rápido, sendo bastante difundidos na indústria aeroespacial, automobilística, de bioengenharia, de produtos elétricos (utensílios domésticos), de produtos eletrônicos, setor de joalheria, artes, arquitetura, medicina, educação e etc [9]. Nas duas últimas décadas observa-se um maior uso dos conceitos de PR e FR dentro das indústrias, isso se dá pelo aumento na taxa de uso e pela aderência em novos campos das tecnologias aditivas. Esse aumento é crescente proporcionalmente ao número de profissionais e empresas que tomam conhecimento e aderem estes conceitos nos respectivos processos, seja para desenvolvimento e/ ou manufatura de produto [6].

O desenvolvimento de novas tecnologias aditivas de fabricação cresce dia após dia ao encontro das necessidades do mercado, indústria e sociedade, proporcionando evolução da ciência, tecnologia e dos materiais. Atualmente a expansão das tecnologias inclusas ao conceito da Manufatura Aditiva estão aumentando não só por ela e também pela atual revolução industrial, mais conhecida como quarta revolução industrial ou Indústria 4.0. A MA é um dos pilares da Indústria 4.0, que na sua essência busca processos com maior conectividade das coisas (IoT) e dos sistemas (IoS), velocidade, grandes bancos de dados, repetitividade, precisão, maior segurança, melhor fluxo produtivo e como consequência busca reduzir custos nos diversos processos de fabricação [10, 3].

Todos os processos descritos neste trabalho estão inseridos em setores da indústria, que de certa forma oferecem e requerem sempre melhorias, tornando assim temas a serem explorados também em projetos de pesquisa. Para as indústrias reduzir tempo e custo nas fases de desenvolvimento e fabricação de produtos, mantendo alta qualidade, na maioria das vezes significa alcançar o topo do mercado, permitindo uma posição mais forte e bons preços, isto é

alcançar o sucesso [4]. Tratando do desenvolvimento, fabricação e lançamento de um novo produto no mercado, estar à frente e acompanhar os avanços das tecnologias inseridas em conceitos como da Prototipagem Rápida e do Ferramental Rápido é extremamente importante para as unidades de negócios que querem se manter competitivas e se destacar de seus concorrentes.

1.1. OBJETIVO

O estudo apresenta dois processos de fabricação para ferramentas de Hidroconformação de Chapas e as respectivas matérias primas empregadas, sendo um o processo convencional de fabricação das ferramentas de conformação, que é a partir de conceitos subtrativos de manufatura (usinagem) e o outro um processo com conceito aditivo de fabricação (MA), atualmente ascendente no mercado industrial. Desta forma, o trabalho propõe substituir o processo convencional de fabricação das ferramentas de conformação pelo processo aditivo. Para validação da proposta é necessário que o desempenho mecânico da ferramenta fabricada por MA seja satisfatório tanto quanto o desempenho mecânico da ferramenta fabricada pelo processo convencional, logo, para isto o trabalho visa a fabricação, simulação (MEF), medição tridimensional e ensaio de dois corpos de provas similares às ferramentas de hidroconformação, sendo cada um deles fabricados pelos processos de manufatura mencionados anteriormente. A partir dos resultados obtidos nas fases de ensaios e simulação foi possível avaliar e comparar a estabilidade dimensional (deformidades sobre efeito dos esforços) de ambos corpos de provas. Considerando as tolerâncias dimensionais para este tipo de ferramenta, foi utilizado neste trabalho o valor de até 0.3 mm de deformação máxima para um desempenho mecânico aceitável.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Processo de Hidroconformação

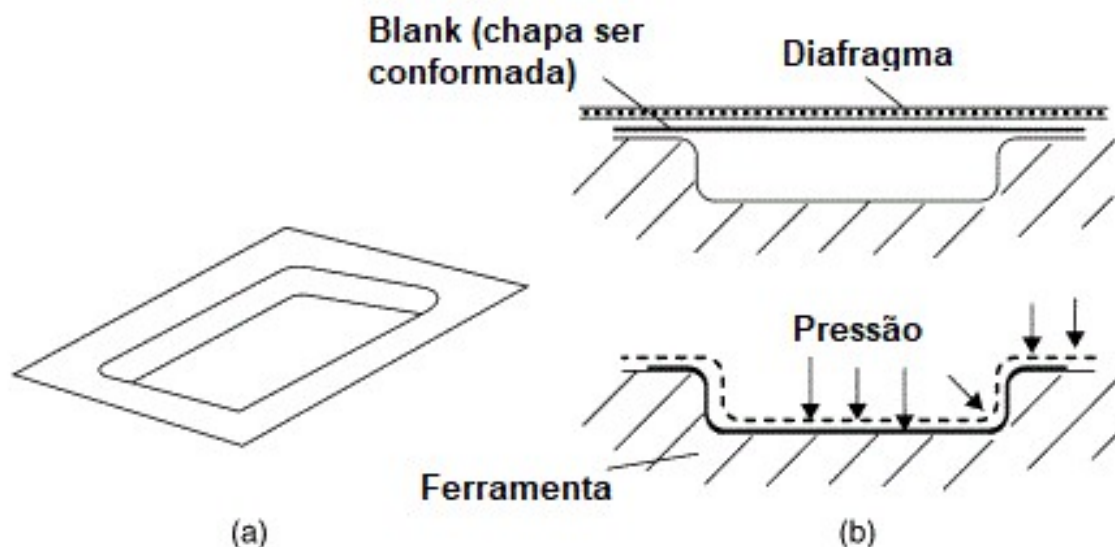
2.1.1. Visão geral do processo de Hidroconformação

O termo Hidroconformação tem origem do termo em inglês “Hydroforming”, que também é conhecido como Conformação Hidrostática, Hidroformação e Hidroformagem. Há relatos que evidenciam o início da Hidroconformação no século XX e as patentes de técnicas deste processo registadas ao longo do mesmo século nos EUA, na Europa (em particular, na Alemanha) e no Japão [11].

Este é um processo de fabricação mecânico, que possui princípios derivados da conformação, mais especificamente de processos de estampagem. O processo é utilizado na fabricação de peças em variados setores da indústria, especificamente para conformação de tubos e chapas, entregando alta resistência nas peças conformadas devido ao encruamento da matéria prima no processo e conformação [12]. Esta característica ocorre devido as conformações serem feitas a frio (abaixo da temperatura de recristalização). A tecnologia é aplicada na conformação de materiais como por exemplo ligas de alumínio, bronze, cobre, aço, titânio, entre outras, sendo considerado um processo de baixo custo e simples, logo atrativo para fabricantes e pesquisadores [13]. Outros pontos positivos do processo estão ligados a ótima viabilidade para a produção de pequenos lotes de peças metálicas de formato complexo e de espessura reduzida (peças com peso muito pequeno), porém por outro lado peças complexas com relativa profundidade possuem limitação neste processo de conformação [13, 14].

A técnica se baseia na conformação de peças metálicas a partir da aplicação simultânea de dois mecanismos, a pressão hidrostática do fluido e os esforços de compressão no material a ser conformado [15]. Simplificadamente é um processo que utiliza de um fluido em elevada pressão para conformar ou um metal dúctil pré-conformado (para tubos) ou um blank (para chapas) sobre uma matriz que possui as características (contornos, furos, forma e rebaixos) do produto final desejado. Em aplicações específicas como na conformação de tubos a pressão de trabalho pode chegar até aproximadamente 1035 MPa e em outras aplicações como na conformação de chapas de alumínio a pressão de trabalho pode variar aproximadamente entre 30 MPa a 200 MPa [16]. A Figura 1 mostra o conceito de conformação deste processo.

Figura 1 - (a) Peça conformada (b) Sequencia da conformação no processo de Hidroconformação (adaptada)



Fonte: [17].

No final da década de 90 foi amplamente aplicada na indústria automobilística e aeroespacial para conformação de componentes e peças caracterizadas como leves e de alta complexidade. Essa aplicação se deu devido as necessidades industriais surgidas, tais como a redução do ciclo e melhorias nos controles dos processos para fabricação de produtos. Nesse mesmo período, desenvolvimentos e características da tecnologia foram discutidas em detalhes, em busca de melhorias para o processo de conformação, especialmente para chapas e tubos. Atualmente é um processo bem conhecido e bastante estabelecido na indústria de tubos, automotiva e principalmente aeroespacial. Nas últimas quatro décadas houve um aumento de interesse do mercado na tecnologia devido suas vantagens e por apoiar o desenvolvimento das tecnologias correspondentes [16, 18].

A Hidroconformação, de forma geral, possui algumas vantagens, tais como:

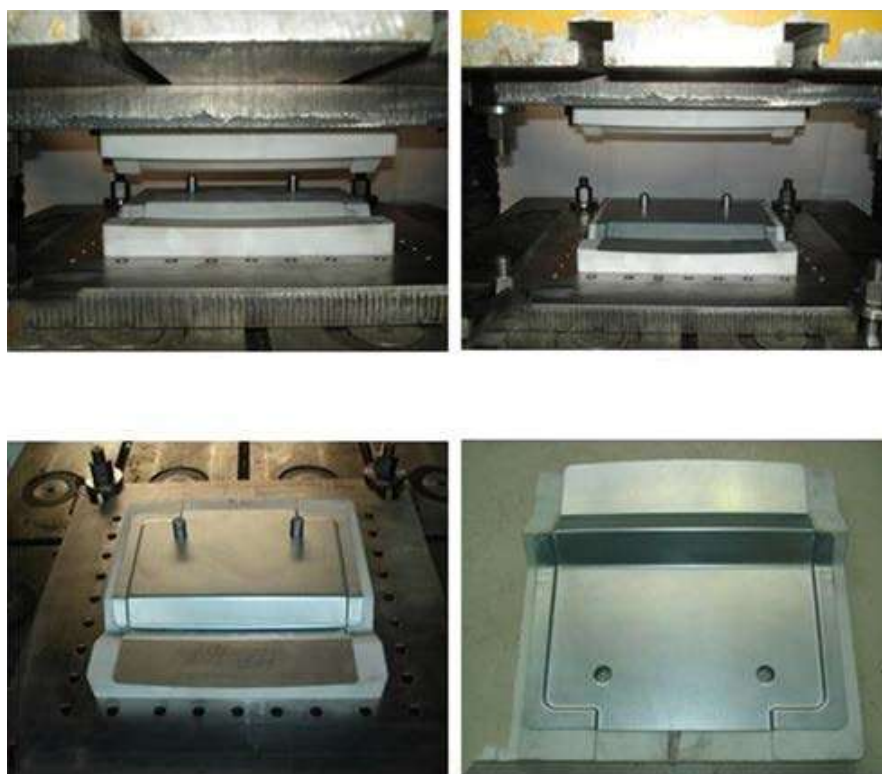
- Eliminação de regiões unidas por solda ou outros tipos de uniões e consequentemente aumento da rigidez do produto;
- Alta reprodutibilidade do processo e repetitividade dimensional do produto;
- As matrizes podem ser utilizadas para diferentes espessuras de chapas;
- Fabricar peças complexas (côncava, oca e outras);
- Rígido controle na espessura da parede de tubos e de chapas conformadas;
- Mantém as propriedades mecânicas do material;
- Produzir protótipos simples e baratos;
- Produzir peças com menor massa (leves);

- Boa qualidade superficial [19].

Devido a possibilidade de produzir peças reforçadas sem flanges, componentes da indústria automobilística puderam ser fabricados e consequentemente as vantagens dessa tecnologia foram incorporadas no processo de fabricação das montadoras. Por muitos anos, componentes automotivos como eixo traseiro, eixo dianteiro e partes do chassi foram fabricados pelo processo de Hidroconformação, tornando-se mais tarde estas peças fabricadas a partir do processo de estampo convencional, forjamento e soldagem [20]. Por outro lado, há relatos de fabricantes como a Piper Aircraft que empregam a Hidroconformação de Chapas para manufaturar centenas de peças estruturais de alumínio em seus projetos [21]. Ainda dentro da indústria aeroespacial, outras companhias fazem uso deste processo para produção de peças a serem utilizadas nas montagens de suas aeronaves. No Brasil, exemplo disso é a multinacional Embraer, fabricante brasileira de aviões comerciais, executivos, agrícolas e militares.

A Figura 2 mostra uma ferramenta manufaturada aditivamente utilizada no processo de conformação de chapas.

Figura 2 - Vistas de uma ferramenta de policarbonato (PC) impressa em 3D e aplicada no processo de Hidroconformação com prensa hidráulica (adaptada)

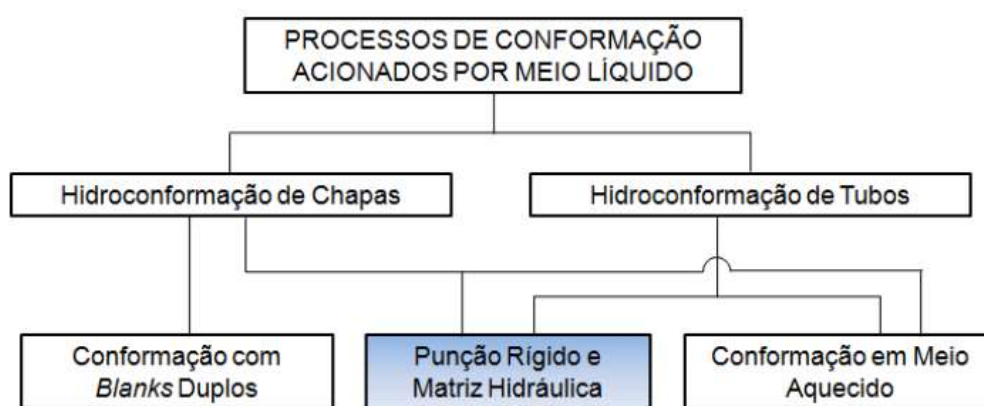


Fonte: [22].

2.1.2. Classificação dos processos de Hidroconformação

Na busca de melhores índices de conformação e faixas de tolerâncias mais apertadas para os produtos conformados, o processo de Hidroconformação teve diversas variações criadas, definindo assim uma estrutura de classificação das técnicas de acordo com os diferentes blanks e metal pré-conformado, e diferentes características de processo. Basicamente o processo foi dividido em cinco tipos, conforme mostrado na Figura 3 [16, 23].

Figura 3 - Tipos do processo de Hidroconformação



Fonte: [14].

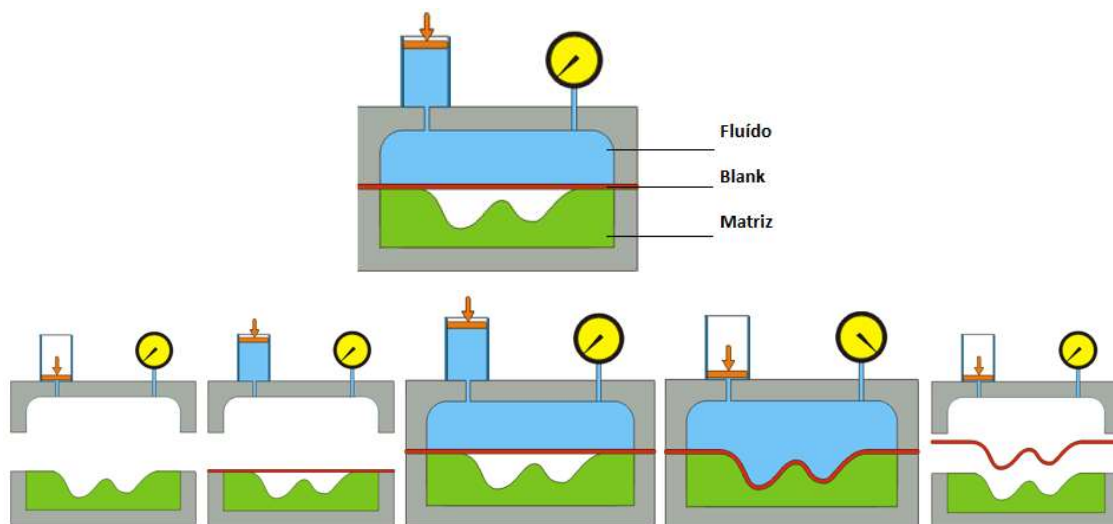
A ferramenta de conformação objeto de estudo deste trabalho é utilizada no processo de Hidroconformação de Chapa com o método de diafragma de borracha, processo de conformação que será melhor explicado no tópico seguinte.

2.1.3. Hidroconformação de Chapa

Os primeiros conceitos deste processo surgiram na década de 30. Alguns autores reforçam que o processo surgiu no período de antecipação à 2ª Guerra Mundial [11, 16]. Este processo possui baixo custo no que tange as necessidades de equipamentos, sendo muito utilizado na fabricação de pequenos lotes de peças, principalmente em alumínio [13]. As ferramentas utilizadas na estampagem são denominadas ou por molde ou punção mais apoio para a peça ser conformada. Na Hidroconformação de Chapa a matriz ou punção é substituído pela pressão do fluido em sua maior parte do tempo de conformação, ficando um dos lados da chapa exposto ou a uma membrana ou a um diafragma de borracha. Este último produz uma distribuição de deformações maior e mais uniforme em toda a superfície da chapa [11].

Na Figura 4 é mostrado as fases do processo de Hidroconformação de Chapa.

Figura 4 - Fases do processo de Hidroconformação de Chapa (adaptada)



Fonte: [24].

O processo de Hidroconformação de Chapa é subclassificado em:

- Hidroconformação com diafragma de borracha (punção rígido);
- Hidroconformação profunda hidromecânica/ hidrodinâmica (meio aquecido);
- Hidroconformação de chapas pareadas/ paralelas [18].

2.1.3.1. Hidroconformação com Diafragma de Borracha (punção rígido)

Método de conformação desenvolvido no final da década de 50, inicialmente muito utilizado na indústria bélica e aeronáutica, atualmente a tecnologia é ainda muito empregada na indústria aeronáutica e automobilística. O processo é muito aplicado na fabricação de peças com espessura controlada e com baixos volumes (quantidade), devido ser um processo com alta flexibilidade. O equipamento utilizado neste processo é definido como prensa com célula ou câmara preenchida de fluido vedada por um diafragma elástico (de borracha), não permitindo contato direto entre o fluido e a chapa [25]. O processo dispensa a utilização de conjunto de matrizes (macho e fêmea), desta forma a superfície do diafragma serve como uma matriz universal, podendo assumir qualquer forma, capaz de exercer esforços sobre uma chapa metálica (blank). Estes esforços são responsáveis por pressionar a chapa contra a ferramenta macho (também conhecido como punção ou encostador) fazendo-a adquirir o formato deste [11, 26]. De forma geral, apesar de simples, o processo requer habilidade e conhecimento, pois

a ausência de um sistema macho-fêmea capaz de garantir um completo travamento do blank pode ser encarado como um problema permitindo movimentos indesejados do material e possíveis não conformidades no produto final conformado [14].

As vantagens dessa tecnologia são:

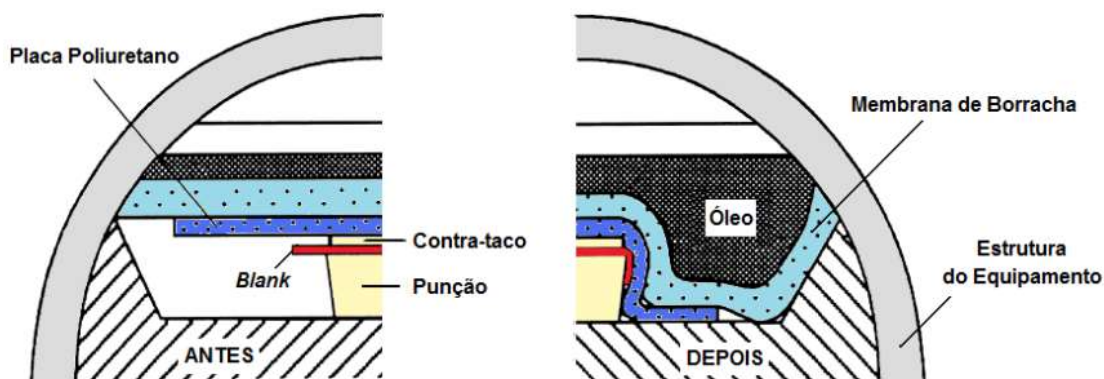
- Superfície conformada com maior qualidade;
- Conformação de peças complexas;
- Ideal para pequenos lotes de produção.

Como todo processo, este também possui suas desvantagens, que são descritas abaixo:

- Processo com baixa eficiência (produtividade);
- Necessidade de prensas com maiores cargas;
- Facilidade de danificar o diafragma de borracha;
- Difícil controle de rugas na peça conformada [11, 16, 27].

Na Figura 5 é mostrado o conceito de conformação com diafragma de borracha.

Figura 5- Conceito da hidroconformação com diafragma de borracha (punção rígido)



Fonte: [14].

No geral, as pressões de trabalho deste processo de conformação podem variar de aproximadamente 20 MPa a 100 MPa. Esta variação se dá de acordo com os requisitos e características das peças a serem conformadas, como por exemplo tipo de liga, espessura da chapa, raio de conformação e outras. A pressão que será utilizada neste estudo está dentro da faixa citada anteriormente [21]. Os produtos conformados possuem geometrias diversas, conforme exemplo mostrado na Figura 6.

A prensa utilizada para o processo de conformação possui uma base, definida como gaveta, para apoio e posicionamento das ferramentas, conforme mostrado na Figura 7 (b). Pode-

se afirmar que cada ciclo de prensagem é feito com várias ferramentas de uma única vez, podendo produtos diferentes serem conformados juntos. Dependendo o tamanho da gaveta e os parâmetros de cada produto a ser conformado, pode-se ter mais de 30 ferramentas diferentes conformando diferentes produtos de uma única vez.

Figura 6 - Exemplo de peça hidroconformada com diafragma de borracha (adaptada)



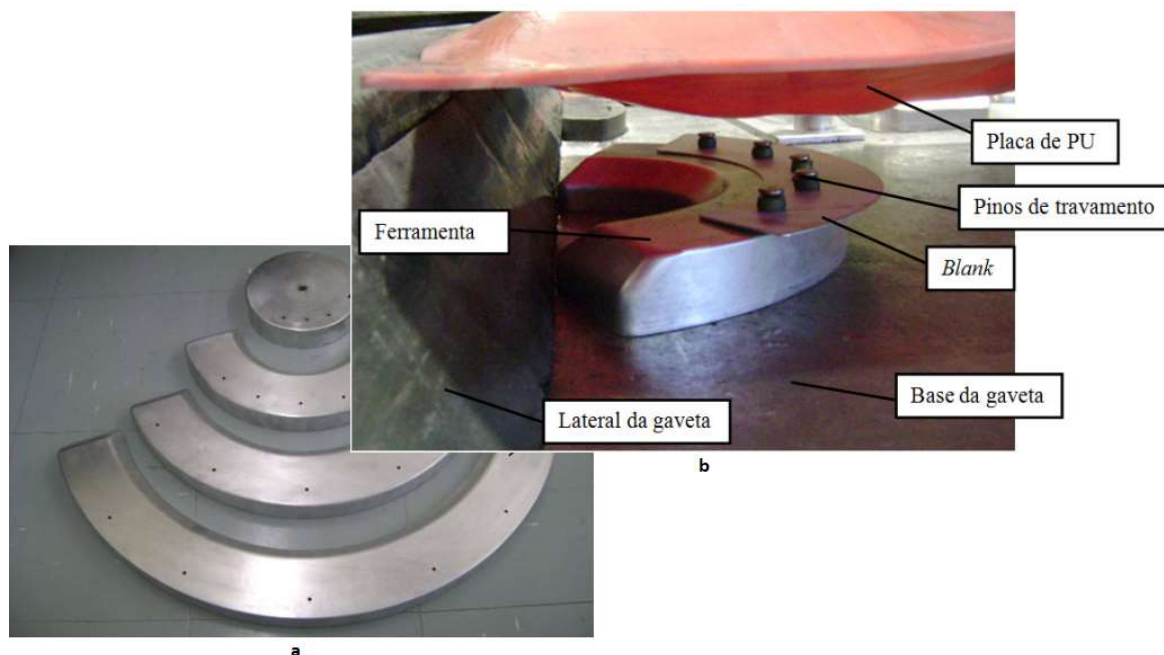
Fonte: [18].

2.1.3.2. Ferramenta para Hidroconformação com Diafragma de Borracha

Grande parte das ferramentas de conformação utilizadas nos mais variados processos de conformação são desenvolvidas para serem fabricadas em sua minoria por processo de fundição e acabamento usinado, e na maioria por técnicas subtrativas, mais especificamente por usinagem. As matérias primas mais empregadas nesta fabricação são ligas metálicas, polímeros e madeira, que variam de acordo com as necessidades de cada segmento industrial e requisitos do processo de conformação empregado na fabricação do produto final. [4, 28]. Para o processo de Hidroconformação com Diafragma de Borracha, em quase 100% das vezes, os materiais empregados para fabricação das ferramentas são ou ligas de alumínio (maior parte) ou aço carbono.

As ferramentas utilizadas em processos de Hidroconformação com Diafragma de Borracha possuem as mais variadas geometrias, tamanhos e características similares. Para esclarecimento são apresentados alguns exemplos destas ferramentas na Figura 7, que são similares aos corpos de provas estudados neste trabalho.

Figura 7 - (a) Exemplo de ferramentas de alumínio e (b) aplicação da ferramenta no processo de conformação com diafragma de borracha (adaptada)



Fonte: [14].

No item 3 (materiais e métodos) será discutido e apresentado as informações técnicas de fabricação e dos materiais utilizados para ambas ferramentas de prova deste estudo.

2.2. Ligas de Alumínio

As ligas de alumínio são os materiais mais versáteis aplicados pelo homem na indústria metal mecânica, isso se dá devido ao grande desenvolvimento das indústrias que participam do processo de transformação do minério de alumínio em produto final (ligas de alumínio). O alumínio é considerado o elemento metálico em maior quantidade na crosta terrestre e é obtido naturalmente a partir de alguns minérios, sendo o principal deles a bauxita. O alumínio em seu estado puro não possui elevada resistência mecânica, para alcançar propriedades mecânicas consideráveis é necessário a adição de elementos de liga e aplicação de tratamentos térmicos. Pode-se afirmar que o alumínio em seu estado puro é um material praticamente sem aplicações mecânicas, sendo sua aplicabilidade apenas na forma de ligas [29 - 31].

As ligas de alumínio permitem o processamento por vários processos de fabricação mecânica como por exemplo: forjamento, usinagem, corte, dobra, estampagem, furação, extrusão e soldagem, conferindo-lhe uma grande aplicação [32]. Em grande maioria, os processos que consomem este tipo de material são processos subtrativos, de conformação e de

união. Atualmente alguns fornecedores de máquinas como a AMS (Advanced Manufacturing Systems) e DMG MORI, já oferecem equipamentos para fabricação aditiva de peças e produtos com liga de alumínio em pó.

A classificação das ligas de alumínio se dá de três formas, ligas de fundição, ligas tratáveis e ligas não tratáveis termicamente. As ligas são identificadas por um conjunto de quatro números seguidos de um dígito quando tratadas termicamente e podem ser agrupadas em série a partir das suas propriedades mecânicas [29, 33].

Segundo o sistema de classificação da Aluminum Association (AA), a identificação do alumínio comercialmente puro é feita pela série 1xxx. Os diferentes graus de pureza vão desde 99% (chamado de 1000) até 99,99% (1099). Depois de passarem por processos industriais, esses tipos de ligas são usados para a fabricação de esquadrias, tubos, chapas, janelas, entre outros produtos. As ligas das séries 2xxx a 8xxx possuem outros elementos químicos em sua composição, como cobre, manganês, magnésio, zinco, entre outros. Já as ligas pertencentes a série 9xxx são conhecidas como ligas reservadas para o futuro [34; 35].

As variadas séries para as ligas de alumínio trazem pontos muito positivos quanto ao uso e empregabilidade, pois diferentes tipos de elementos de liga (Zn, Mg, Si, Cu e outros) unidos ao alumínio oferecem para cada tipo de combinação características diferentes abrindo enormes oportunidades de uso do material nas mais variadas áreas e aplicações. Um exemplo disso é a característica de baixa soldabilidade, uma desvantagem na maioria das ligas de alumínio, porém as ligas Al-Si são facilmente soldáveis com baixo encolhimento após a solidificação. As ligas de alumínio possuem muitas vantagens, tais como baixa densidade, se comparada com outros materiais metálicos como o ferro e aço, possuem alta resistência específica, boa resistência à corrosão, boa usinabilidade e preço atrativo, se comparado com aços especiais e titânio. Apesar dessas boas características, até recentemente, foi um material com média atenção no mercado, se comparado com outros materiais metálicos [33, 36].

As ligas de alumínio possuem características atrativas que levam à estudos e aplicações em processos de conformação superplástica, que é a capacidade de qualquer material metálico deformar uniformemente (alongamento) mais de 200% sob tensão antes da falha [37].

As ligas de alumínio são caracterizadas por apresentar um comportamento não-linear elástico, não sendo possível definir seu limite de elasticidade como a do aço. O alumínio não apresenta no seu diagrama Tensão x Deformação um patamar de escoamento e por esta razão a tensão de escoamento é determinada por métodos convencionados como o método do off set (0,2 %) [32, 38].

Materiais leves como as ligas de alumínio proporcionam grandes reduções de peso em projetos automobilísticos, aeronáuticos, entre outros. Devido esta característica somada as boas características mecânicas destes materiais os tornam uma das opções mais utilizadas para projetos diversos de produtos, ferramentas, moldes e outros dispositivos. Ligas de alumínio são bastante empregadas na fabricação de ferramentas utilizadas no processo de Hidroconformação de Chapas [39, 40, 41], que é objeto de estudo deste trabalho. Exemplos deste tipo de ferramenta são mostrados na Figura 7.

Em uma visão geral, as ligas mais utilizadas para fabricar moldes, punções e ferramentas para diversos processos de conformação são as das séries 5xxx, 6xxx e 7xxx. Devido as ligas da série 7xxx atingirem os níveis mais elevados de resistência mecânica entre todas as ligas de alumínio, os torna uma série bastante empregada na fabricação de produtos que requerem alto nível de desempenho mecânico, por exemplo peças estruturais de aeronaves [40]. As ligas da série 7xxx possuem um maior valor agregado e ligas da série 6xxx são mais empregadas na fabricação de moldes e ferramentas.

Entre as ligas da série 7xxx (Al-Zn) destacam-se os subgrupos Al-Zn-Mg e Al-Zn-Mg-Cu. Assim como as ligas Al-Cu e Al-Mg-Si são ligas endurecíveis por precipitação, ou seja, mediante tratamento térmico controlado e condições específicas apresentam ganhos significativos de dureza [42].

2.3. Poli(éter-imida) - PEI

É um polímero pertencente à família dos termoplásticos e é considerado de alto desempenho. A poli(éter-imida) (PEI) apresenta característica amorfa, cor transparente e âmbar, e com alta performance mecânica apesar de se tratar de um polímero semi cristalino. É um material com alta densidade (1,24 - 1,25 g/cm³) se comparado com os polímeros tradicionais. Possui bom desempenho térmico, elétrico, boa rigidez, possui baixíssimo atrito, alta estabilidade dimensional, alto coeficiente de expansão térmica linear, excelente resistência química, é retardante de chama (baixa flamabilidade) e quando em combustão quase não libera fumaça e toxicidade, sendo classificado como V0 para a normativa UL94. A baixa característica de flamabilidade permite grande utilização em soluções de proteção térmica, tornando um ótimo candidato para aplicações em projetos aeronáuticos e automobilísticos [43 - 49], além de ser bastante difundido na fabricação de peças eletrônicas de alto desempenho e como biomaterial [50]. Em sua maioria, os PEI disponíveis no mercado são reforçados com outros

materiais e não puros. Os valores de algumas das propriedades mencionadas anteriormente podem ser observados na Tabela 1.

Com os avanços da engenharia e ciências dos materiais surgem cada vez mais novas ligas poliméricas e materiais compósitos como base o PEI. As poli(éter-imida)s são sintetizadas pelo processo de policondensação e possuem estrutura química com unidade de repetição [51].

Tabela 1 - Propriedades mecânicas da poli(éter-imida)

PROPRIEDADES - POLI(ÉTER-IMIDA)	
Densidade [g/cm ³]	1,28
Temperatura vítrea (Tg) [°C]	217
Resistência a abrasão - ASTM D1044 (mg/1000 ciclos)	10
Módulo de compressão [GPa]	2,9
Limite de resistência a tração [MPa]	140
Elongação de ruptura [%]	60
Dureza - Rockwell	R125
Resistência ao impacto - IZOD [J.m ⁻¹]	50
Coefficiente de Poisson	0.44
Módulo de elasticidade [GPa]	2,9
Limite de resistência a tração [MPa]	85
Condutividade térmica [W/m.K]	0,0644

Fonte: [52].

Os polímeros de forma geral são muito consumidos pelas tecnologias aditivas de fabricação (MA), mas a poli(éter-imida) possuem propriedades específicas como baixo atrito, resistência a chama e resistência química, já citadas anteriormente, que atraem muito o setor aeroespacial, na qual detêm grande porcentagem do uso destas matérias primas [21].

2.4. Manufatura Aditiva - IMPRESSÃO 3D

A partir da década de 80 houve inclusão de novos processos e softwares de engenharia que revolucionaram a indústria e o mercado. Hoje esta revolução é ainda maior quando estes avanços são somados à Manufatura Aditiva. Essa evolução permitiu e permite cada vez mais desenvolver e fabricar qualquer produto com auxílio de softwares e hardwares específicos. Exemplo disso foi a inclusão de ferramentas CAD (Computer Aided Design) para criação de um sólido tridimensional ou protótipo virtual no auxílio da fase de desenvolvimento de um produto [53].

O conceito aditivo foi desenvolvido no início da década de 80 sendo patenteada a primeira tecnologia no final desta mesma década. A primeira tecnologia desenvolvida é a Estereolitografia, sigla SLA (Stereolithography Apparatus). Todas as tecnologias inseridas no conceito de MA são baseadas no seguinte princípio: fabricação por adição de material, diferenciando de outros processos de adição devido a deposição ser a partir de camadas planas sucessivas, isto é, baseado no princípio da manufatura por camada, conforme ilustrado na Figura 8. Outro grande diferencial deste processo é a facilidade de operação e ausência de pré-configurações com alto tempo, não precisando usar moldes e ferramentas, diminuindo abruptamente a interface do operador no processo. Devido este processo ter sido aplicado preliminarmente na produção rápida de peças protótipos, sem requisitos de resistência e precisão, o mesmo foi incluído no conceito da Prototipagem Rápida. O processo teve outras denominações feitas por vários autores, como por exemplo manufatura por camada, fabricação de forma livre, manufatura de bancada, manufatura acrescentando material, prevalecendo o nome original do processo mesmo depois das técnicas terem sido aprimoradas e serem aplicadas na fabricação de peças para uso final. O uso da MA cresce cada vez mais e está sendo utilizada e inserida em vários ramos da indústria, destacando-se 3 grandes áreas de aplicações: I - Projeto, II - Engenharia, Análise e Planejamento e III - Manufatura e Ferramental. Na década de 90 iniciou-se o uso das primeiras tecnologias aditivas para auxiliar a fabricação de produto. Até então a tecnologia apenas era aplicada na fase de projeto e subfases de desenvolvimento do produto, na qual segue em uso até os dias atuais [6].

A Figura 8 mostra o conceito das camadas do processo aditivo a partir da referência de um modelo 3D.

Figura 8 - Fatiamento do modelo CAD em camadas planas



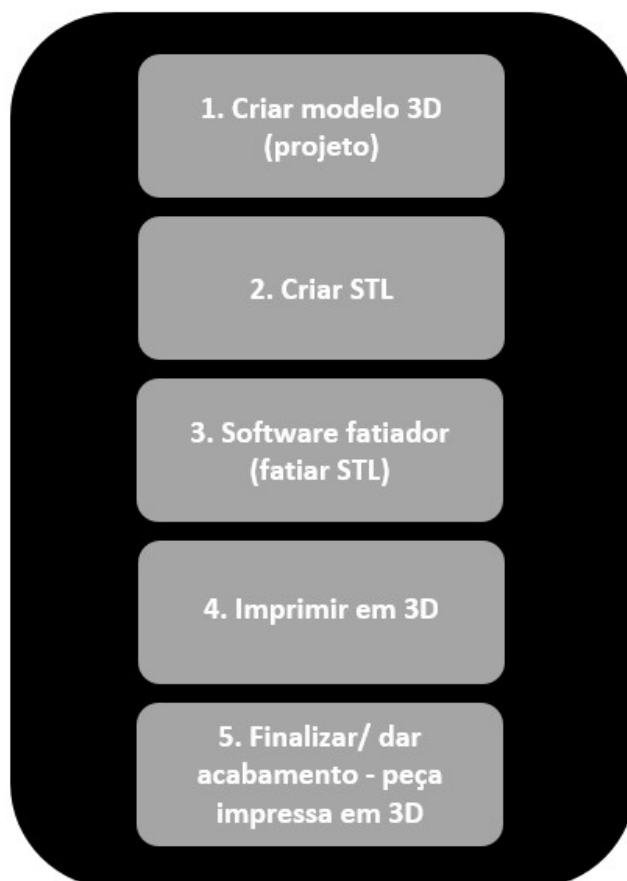
Fonte: [54].

Historicamente a fabricação de objetos utilizando do conceito por camadas é antigo e segundo alguns autores as técnicas atuais da PR seguem o mesmo conceito de duas grandes técnicas, sendo elas a Topografia e a Fotoescultura, ambas surgidas no século XIX [2]. Parte dos pesquisadores fazem referência à Manufatura Aditiva usando da tecnologia Impressão 3D e com início na Terceira Revolução Industrial [21].

O número de técnicas incluídas dentro da Impressão 3D supera a quantidade de 20. Apesar de todas usarem diferentes técnicas para adição de material, todas se baseiam no mesmo princípio de manufatura por camadas planas sucessivas podendo a matéria prima utilizada ser agrupada pelo estado ou forma inicial antes do processamento. O agrupamento baseado no estado da matéria prima pode ser líquido, sólido e pó [6].

As variadas técnicas de PR possuem etapas similares em seus respectivos processos, sendo de uma forma geral cinco etapas comumente aplicadas, tais como (1) criação de um modelo CAD, (2) conversão do modelo CAD em formato STL, (3) fatiamento do arquivo STL em camadas de seção transversal, (4) fabricação do produto e (5) acabamento superficial e limpeza do produto [55 - 56], conforme mostrado a sequência da Figura 9.

Figura 9 - Representação das principais etapas da Prototipagem Rápida (adaptada)



Fonte: [55].

Essa tecnologia de fabricação nada mais é que construir algo físico a partir do zero, camada a camada seguindo um modelo virtual tridimensional, ou seja, em três dimensões. De uma forma mais técnica, na visão da ASTM (American Society for Testing and Materials) o termo Manufatura Aditiva significa: “...processo de união de materiais para a criação de objetos a partir de dados de um modelo tridimensional, usualmente camada sobre camada, de forma oposta ao processo de manufatura subtrativa”. Também de acordo com a ASTM, os sinônimos de Manufatura Aditiva são: fabricação aditiva, processo aditivo, técnicas aditivas, manufatura aditiva por camadas, manufatura por camadas ou ainda, fabricação de forma livre (freeform) [54].

O processo de fabricação é ideal para pequenos volumes (carácter dimensional e quantitativo) e produção customizada. A Manufatura Aditiva está habilitando um novo e iterativo processo de criação de projetos, permitindo custos mais baixos, menor peso e produtos manufaturados em fração de tempo, se comparado com a década passada. Baixos volumes fazem a Impressão 3D um atrativo, tornando uma alternativa de menor custo para substituir a tecnologia de usinagem CNC convencional e outros processos para fabricação de peças com menores escalas e de uso em montagens finais [21]. Com os diversos métodos da Manufatura Aditiva é possível fabricar geometrias e estruturas complexas em peças com uma única operação sem utilizar de dispositivos de conformação [57].

É evidente que um significativo impacto nos processos de fabricação está sendo causado pela fabricação aditiva. A tecnologia está sendo usada para fabricar dispositivos, postigos de moldes de injeção, ferramentais e fixadores. Muitas ferramentas de produção podem ser manufaturadas com menor custo e maior rapidez, ou seja, os itens podem estar prontos em horas e não em semanas, se utilizado da Manufatura Aditiva ao invés de processos tradicionais [21].

A MA também conhecida como Impressão 3D proporciona a materialização de um modelo físico (produto), que posteriormente pode ser utilizado em uma análise ergonômica, de projeto, da funcionalidade do produto dentro da montagem e outras análises funcionais. A técnica surgiu como uma tecnologia chave, apresentando reduções no tempo de entrega, em alguns casos, próximo a 60% em relação aos processos tradicionais antes utilizados. Em uma simples comparação, há 15 anos era necessários seis anos para desenvolvimento de um produto automobilístico, enquanto hoje o tempo de desenvolvimento reduziu para 18 a 12 meses, na média [58].

A Impressão 3D vem sendo empregada nos mais variados processos de fabricação e setores dentro e fora da indústria. Dois setores com grande aplicação são: setor aeroespacial e setor automobilístico. O setor aeroespacial utiliza da MA como uma tecnologia inovadora,

buscando agressivamente oportunidades e novas aplicações dentro dos seus respectivos processos. Grandes fabricantes, líderes do mercado aeroespacial, já estão utilizando dessa tecnologia para fabricar protótipos, moldes e fixadores, ferramentas de produção, peças para instrumentação, dutos de ar, peças a serem utilizadas na montagem final de asas de pequenos aviões e em veículos não tripulados [21]. Um exemplo no mercado aeroespacial é da GKN Aerospace, empresa britânica, que assinou recentemente um acordo de cinco anos com o Oak Ridge National Laboratory, no Tennessee, para encontrar novas formas de imprimir grandes peças estruturais de aeronaves em titânio. A intenção é reduzir o desperdício de material em até 90% e diminuir o tempo de montagem em 50% [59]. Na maioria das vezes a busca por tecnologias aditivas na fabricação de produtos de uso final é para reduzir massa do produto e prazo de entrega, sempre visando reduções de custo ao cliente e competitividade de mercado.

A Figura 10 mostra uma peça de grande volume, com sua maior dimensão próxima de dois metros, fabricada a partir de MA e material metálico.

Figura 10 - Peça impressa em 3D com material metálico (deposição de metal a laser)



Fonte: [60].

Outros setores da indústria distantes das aplicações mecânicas industriais, como exemplo a área alimentícia, bens de consumo e outras, estão aderindo o uso de tecnologias

aditivas. Um mercado interessado na tecnologia é setor de bens de consumo, especificamente indústrias de calçados. Grandes marcas como a Adidas já aposta neste tipo de tecnologia para fabricar solas de tênis em alta escala, na qual pretende usar as solas impressas em 3D para fazer tênis de treinos em duas novas fábricas altamente automatizadas na Alemanha e na América em vez de produzi-las nos países asiáticos de baixo custo. O ganho com esta nova estratégia é lançar os calçados no mercado em menor tempo. Obter um design e produto desenvolvido para o mercado pode demorar meses, já com o uso da tecnologia de impressão o ciclo de entrega final pode ser reduzido em até uma semana ou mais [59].

A MA percorreu um longo caminho rapidamente. Em fevereiro de 2011, quando o jornal “The Economist” publicou uma história chamada “Print me a Stradivarius”, a ideia de imprimir objetos ainda parecia fictícia, atualmente a ideia está bem estabelecida. A fabricação por adição, como é conhecido tecnicamente, está acelerando os projetos de prototipagem e também está sendo utilizado para criar produtos personalizados e complexos para venda real. Estes produtos variam desde dentes postiços, joias até peças para carros e aeronaves. Para alguns a Impressão 3D ainda não é onipresente e permanece muito lenta para a produção em massa, também muito caro para algumas aplicações e para outros produz resultados não conforme para o padrão exigido [59].

Ambos parágrafos anteriores deixam claro que os recentes avanços tecnológicos tornam a Impressão 3D um grande competidor para produção convencional em massa e faz acreditar que associada à Prototipagem Rápida irá impulsionar as fábricas do futuro.

Atualmente o alcance de fabricação com esse tipo de tecnologia pode ser ampliado para necessidades biológicas. A aplicação de técnicas aditivas na biologia é conhecida como bioimpressão. Técnica utilizada em estudos para produção de órgãos a serem implantados em humanos. Atualmente pesquisadores americanos estudam a impressão de músculos, orelhas e ossos para testes em animais. Em 2016 cientistas da Northwestern University, em Chicago, imprimiram ovários protéticos e os implantaram em camundongos deixando-os capazes de conceber e dar à luz com a ajuda desses órgãos artificiais. Não é apenas a academia que deseja imprimir órgãos, o setor em questão já está criando impressões 3D de tecidos vivos para utilizar em tratamentos de doenças crônicas em humanos [61]. A indústria médica foi uma das primeiras áreas dentro da saúde a adotar a Manufatura Aditiva, isto se sucedeu por uma boa razão, pois o ser humano é diferente um do outro, portanto, muitas pessoas poderiam precisar de tipos de próteses diferentes (produto customizado), exemplo disso são os milhões de implantes dentários individualmente esculpidos e as carenagens de aparelho auditivos que são

impressos, assim como um número crescente de outros itens como os implantes ortopédicos e órteses [62,63]. A Figura 11 apresenta objetos impressos em 3D aplicados na medicina.

Figura 11 - Modelo de órtese e modelos de estudos para a área médica impressos em 3D



Fonte: [63].

A Manufatura Aditiva se comparado com os processos subtrativos apresenta vantagens e desvantagens.

As vantagens podem ser sintetizadas como:

- Grandes ganhos quando aplicada na fase de Pesquisa e Desenvolvimento do Produto - P&D;
- Não é necessária troca de ferramenta, o componente ou peça é fabricado em uma única etapa de processo;
- Menor tempo e custo para obtenção de protótipos;
- No geral, as técnicas não precisam de dispositivos ou ferramentais para fixação das peças a serem manufaturados;
- Independência da complexidade geométrica da peça;
- Utilizado na obtenção de matrizes ou ferramentais a serem aplicado em processos com menores ciclos produtivos;
- Ausência de cálculos complexos para trajetória da ferramenta [6, 55, 57].

As desvantagens ou deficiências são:

- Característica anisotrópica para as peças impressas, limitando o uso da tecnologia em algumas aplicações (isso se dá devido a fabricação ser por adição de camadas e isto ocorre para alguns tipos de tecnologias utilizadas);

- No geral as propriedades mecânicas dos materiais utilizados neste processo são inferiores as propriedades dos materiais utilizados em processos convencionais (usinagem, fresamento, etc). Por outro lado, com o desenvolvimento de novos materiais e tecnologias aditivas isto vem mudando. Exemplo disso são as novas tecnologias aditivas que utilizam de materiais metálicos, novos materiais compósitos (polímero e metal) e superpolímeros como o PEEK e PAEK;

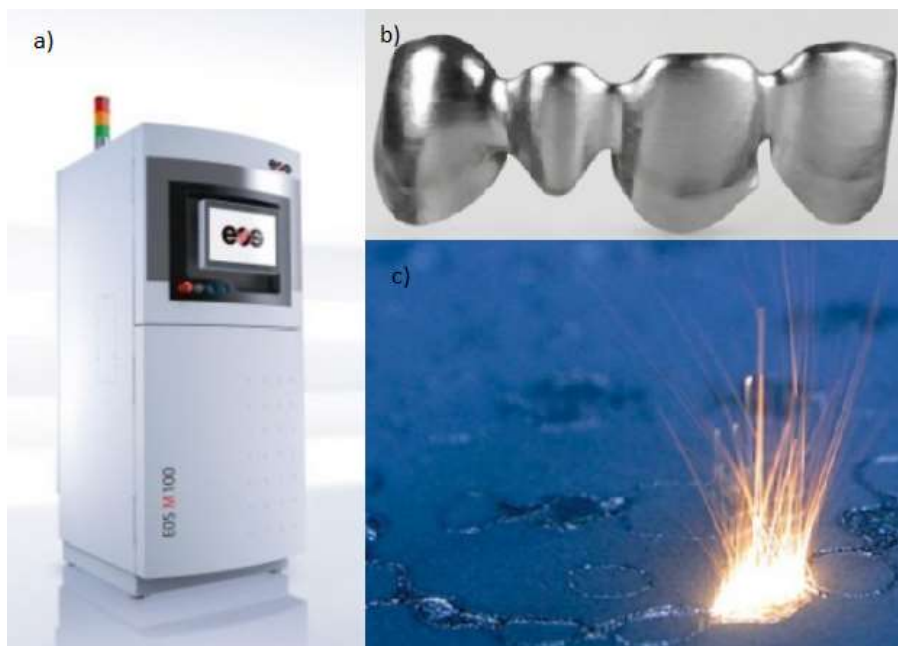
- Menor precisão e menor qualidade do acabamento superficial, se comparado com os processos convencionais (usinagem, fresamento, etc.) [6, 55, 57].

A Impressão 3D possui um enorme leque de materiais a serem utilizados, os mais comuns são polímeros termofixos e termoplásticos. As propriedades desses materiais sofrem desvios, se comparados com as propriedades dos materiais a granel, quando aplicados no processamento aditivo. Para algumas aplicações, por exemplo, peças impressas em processos criogênicos, ainda se tem muita pouca informação do comportamento e das propriedades dos materiais disponíveis em literatura [64].

É importante ressaltar que cada vez mais o conceito da Impressão 3D está avançando e apoiando novas tecnologias, equipamentos e materiais utilizados. O avanço tecnológico busca minimizar ou até mitigar as desvantagens das tecnologias aditivas citadas anteriormente [6].

Inicialmente, os materiais utilizados no processo de Impressão 3D eram apenas cerâmicos, polímeros e resinas, sendo este último a matéria prima inicialmente utilizada devido a primeira tecnologia aditiva desenvolvida usar deste tipo de material. Dentro da última década isto vem mudando e opções de matérias primas metálicas, de madeira, bioplásticos e outras surgem como opção. A Figura 12 apresenta tecnologias aditivas mais recentes que utiliza como matéria prima materiais metálicos.

Figura 12 - a) Máquina de Sinterização a Laser metálica - EOS M100, b) Peça metálica manufaturada pela EOS M100 e c) Processo de fundição do material metálico em pó depositado



Fonte: [35].

No comitê F42 da Sociedade Americana para Testes e Materiais (ASTM) foram reconhecidas e classificadas em sete categorias as tecnologias aditivas e estão apresentadas na Tabela 2. Os processos diferem entre eles de acordo com as técnicas utilizadas para depositar as camadas e na forma como as mesmas são unidas. Além desta diferenciação, há outras três classificações para categorizar as tecnologias da MA, que são [15, 65]:

1- Baseada no estado inicial da matéria-prima

- Líquido (Exemplo: SL, Impressão a Jato de Tinta (IJP) - PolyJet);
- Pó (Exemplo: 3DP);
- Sólido (Exemplo: FDM).

2- Baseado no tipo de material

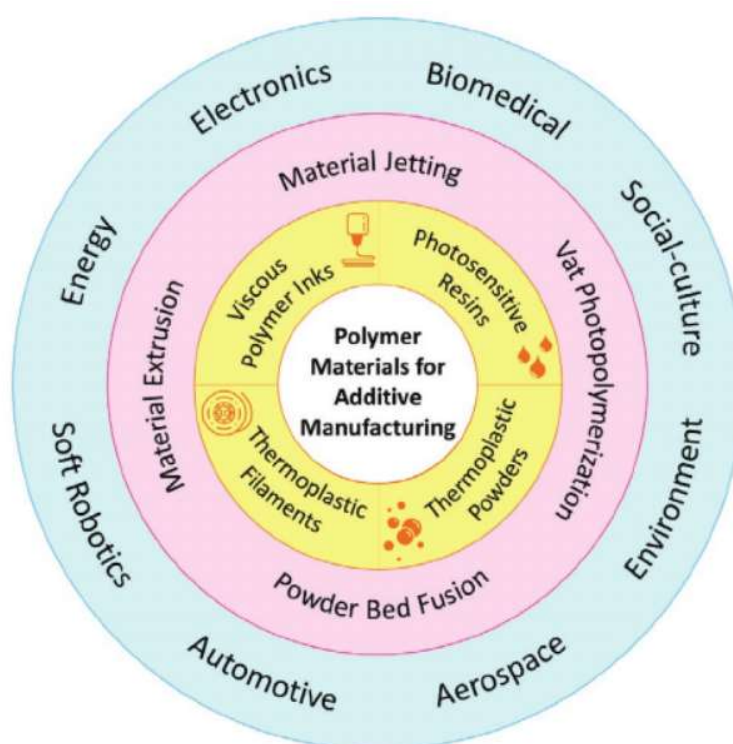
- Polímeros;
- Metais;
- Cerâmicos;
- Compósitos;
- Biológicos.

3- Baseado nos mecanismos de construção (quatro áreas principais)

- Estado da matéria-prima (mencionado anteriormente),
- Fonte de energia;
- Método de construção das camadas;
- Estado da peça criada [66 - 68].

A Figura 13 apresenta uma visão geral dos processos aditivos que utilizam polímeros como matéria prima e seu estado inicial, além de mostrar os mercados de atuação.

Figura 13 - Visão geral dos polímeros usados pelas tecnologias aditivas e respectivas áreas de aplicação



Fonte: [48].

De acordo com as classificações mencionadas anteriormente sobre a categorização das tecnologias aditivas, na sequência será citado as tecnologias, os respectivos estados iniciais e tipos das matérias primas utilizadas em cada processo:

- Estereolitografia (SL): baseado em matéria prima líquida e o tipo é resina;
- Impressão a jato de tinta (IJP): baseado em matéria prima líquida e o tipo é resina;
- Impressão a jato de tinta (IJP): baseado em matéria prima sólida e o tipo é cera e termopolímeros;

- Modelagem por fusão e deposição (FDM/ FFF): baseado em matéria prima sólida e o tipo é polímero;
- Manufatura laminar de objetos (LOM): baseado em matéria prima sólida e o tipo é cerâmica, metal, papel e outros;
- Tecnologia com lâminas de papel (PLT): baseado em matéria prima sólida e o tipo papel;
- Sinterização Seletiva a Laser (SLS): baseado em matéria prima em pó e o tipo é polímero, polímero + vidro, polímero + metal e cerâmica;
- Impressão 3D (3DP): baseado em matéria prima em pó e o tipo é polímero, cerâmica, metal, gesso e material a base de amido;
- Sinterização a Laser: baseado em matéria prima em pó e o tipo é polímero, areia e metal;
- Fabricação de forma final a laser (LENS): baseado em matéria prima em pó e o tipo é metal [1];
- Deposição de metal a laser (LMD): baseado em matéria prima em pó e o tipo é metal;
- Fusão seletiva a laser (SLM): baseado em matéria prima em pó e o tipo é metal [69].

Tabela 2 - Classificação e variações dos processos aditivos com os respectivos tipos de materiais (adaptada)

CATEGORIA		TECNOLOGIA	MATERIAL
1.	Fotopolimerização em tina	Estereolitografia (SLA)	Resinas (curáveis por UV)
			Ceras
			Cerâmicos
		Deposição por projeção digital (DLP)	Resinas (curáveis por UV)
			Ceras
			Cerâmicos
2.	Jato de material	Modelação por jato múltiplo (MJM)	Resinas (curáveis por UV)
			Ceras
		Polyjet	Tipo tinta (fotopolímeros)
3.	Jato ligante	Impressão 3D (3DP)	Compósitos
			Polímeros
			Cerâmicos
			Metais
4.	Extrusão de material	Modelagem por Fusão e Deposição (FDM)/ Fabricação por filamento fundido (FFF)	Polímeros (termoplásticos)
			Compósitos
			Cerâmicos
5.	Fusão em camadas de pó	Sinterização seletiva a laser (SLS)	Polímeros (termoplásticos)
			Metais
		Fusão seletiva a laser (SLM)	Metais
		Fusão por feixe de elétrons (EBM)	Metais
6.	Laminação de folhas	Fabricação de objetos por camadas (LOM)	Papel
			Metais
			Polímeros (termoplásticos)
7.	Deposição de energia direta	Deposição de metal a laser (LMD/ LENS)	Metais
		Fabricação aditiva por feixe de elétrons (EBAM)	Metais

Fonte: [70].

Cada tecnologia de Impressão 3D quando lançadas no mercado, foram desenvolvidas por fornecedores específicos mantendo uma determinada exclusividade sobre as tecnologias e na maioria dos casos asseguradas com patentes. Atualmente ainda há tecnologias que são exclusivas e oferecidas por fornecedores específicos, por outro lado processos mais difundidos como FDM, SLA e SLS já perderam suas patentes proporcionando alta oferta no mercado, ou seja, tornaram mais acessíveis e com menores preços.

Na Tabela 3 é apresentado as sete categorias das tecnologias aditivas e respectivas características, tais como resolução XY, alturas de camada e se utiliza de material de suporte.

Tabela 3 - Características de cada categoria das tecnologias aditivas (adaptada)

CATEGORIA		TECNOLOGIA	RESOLUÇÃO XY [um]	ALTURA DE CAMADA (resolução em Z) [um]	MATERIAL DE SUPORTE	MULTIMATERIAL
1.	Fotopolimerização em tina	Estereolitografia (SLA)	6,5 - 25	25 - 300	Sim	Não
		Deposição por projeção digital (DLP)	35 - 100	25 - 150	Sim	Não
2.	Jato de material	Modelação por jato múltiplo (MJM)	16 - 42	13 - 32	Sim	Sim
		Polyjet	42 - 85	16 - 28	Sim	Sim
3.	Jato ligante	Impressão 3D (3DP)	100	260 - 380	Não	Não
4.	Extrusão de material	Modelação por extrusão de plástico (FDM)/ Fabricação por filamento fundido (FFF)	100 - 150	100 - 320	Sim	Sim
5.	Fusão em camadas de pó	Sinterização seletiva a laser (SLS)	30 - 100	60 - 180	Não	Não
		Fusão seletiva a laser (SLM)	150	30	Não	Não
		Fusão por feixe de elétrons (EBM)	-	-	Não	Não
6.	Laminação de folhas	Fabricação de objetos por camadas (LOM)	200 - 300	100 - 190	Não	Sim
7.	Deposição de energia direta	Deposição de metal a laser (LMD/ LENS)	-	-	Sim	Não
		Fabricação aditiva por feixe de elétrons (EBAM)	50 - 200	-	Sim	Não

Fonte: [48].

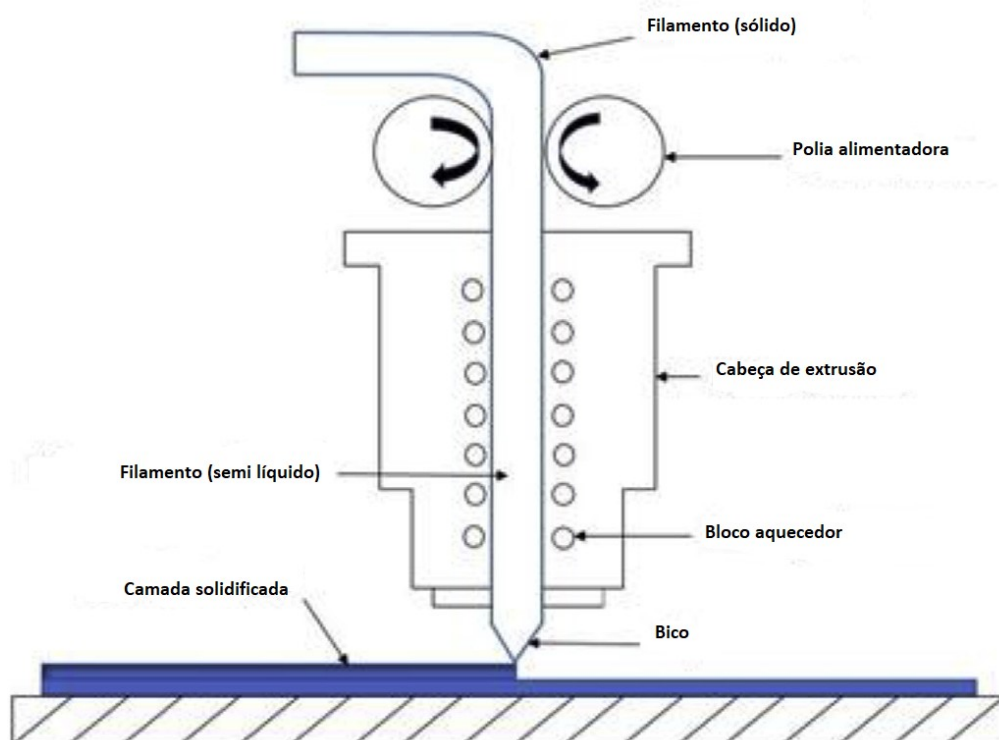
2.4.1. Tecnologia por extrusão de material baseado na MA

A tecnologia aditiva baseada na extrusão de material, também conhecida como FDM ou FFF, tem por característica a extrusão contínua de material por meio de um bico em uma plataforma de construção. Os materiais utilizados em seu estado inicial são em forma de filamento, variando em sua maioria entre duas dimensões de diâmetro 1,75 mm e 2,85 mm. Os filamentos são em polímeros puros ou com soma de cargas dos mais variados tipos (materiais compósitos). Os equipamentos utilizados neste processo são bem mais acessíveis em

comparação com os de outras técnicas aditivas, além de ser compatíveis com uma ampla variedade de materiais. A modelagem por deposição fundida é um processo com extrusão onde o material termoplástico é amolecido (derretido) e depositado (camada por camada de acordo com o conceito aditivo) sendo solidificado após o resfriamento. Por ser um dos processos mais acessíveis em relação a custo, atualmente é muito utilizado no formato “desktop” sendo adotado em pequenos negócios e residências [71]. Em caráter e aplicação industrial, o processo de extrusão de material é o mais popular e empregado principalmente nos setores aeroespacial, automobilísticos, médico e na fabricação de veículos não tripulados. [57, 64, 72].

A Figura 14 mostra o processo de extrusão e deposição de material para esta tecnologia.

Figura 14 - Esquemática: Processo aditivo por extrusão de material (adaptada)



Fonte: [72].

Para os equipamentos utilizados neste processo há três tipos diferentes de mecanismos de movimentação, que são: cartesiano (XYZ), core XY e delta (três graus de liberdade de translação). Nos equipamentos de impressão com o sistema de movimentação denominado core XY possui o cabeçote de extrusão com liberdade de movimentação na direção x e y. A mesa da impressora, ou também denominada como placa, se movimenta na direção z proporcionando a fabricação de camada por camada. Os eixos x e y são os mais precisos, garantindo uma maior precisão das características impressas com esta técnica. No caso da peça a ser impressa possuir

um ângulo maior que o seu próprio ângulo de suporte, faz necessário o uso de material de suporte com função de estruturar e prevenir que o item sofra colapso durante o processo de fabricação [57]. Na Figura 15 é mostrado um objeto impresso com a tecnologia por extrusão de material e uso de suporte (parte branca e objeto final em vermelho).

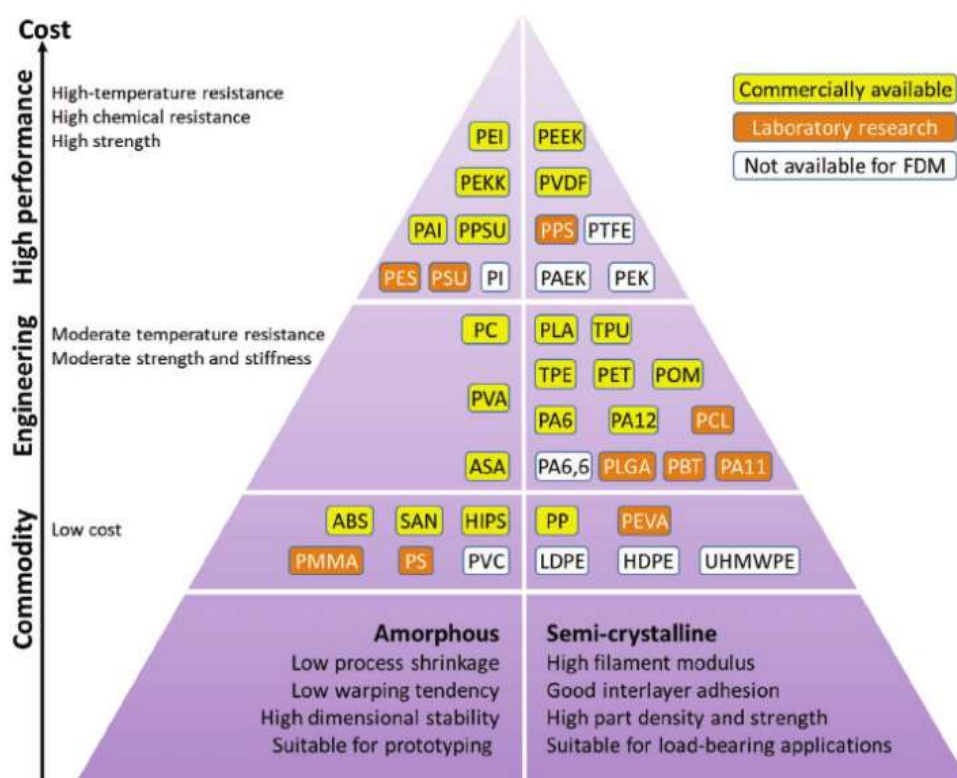
Figura 15 - Exemplo de peça impressa com tecnologia de extrusão de material e suporte (material PVA)



Fonte: [73].

Há casos que o item fabricado com esta técnica apresenta defeitos internos causados pelo diâmetro do filamento e densidade do material que afeta a forma como o termoplástico é extrudado pelo bico. A vantagem desse processo se faz na capacidade de utilizar vários materiais convencionais, de engenharia e compósitos: Copoli (estireno-butadieno-acrilonitrila) [ABS], ácido polilático (PLA), Poli(tereftalato de etileno glycol) [PETG], policarbonato (PC), Poli(éter-imida) [PEI], polímeros reforçados com vidro, metais, cerâmica, e outros [49]. Na Figura 16 são apresentados os filamentos termoplásticos mais utilizados neste processo.

Figura 16 - Filamentos disponíveis comercialmente ou com citações já feitas em literatura científica para o processo de extrusão de material (FDM)



Fonte: [48].

Especialmente com esta técnica é possível manufaturar peças fechadas, estruturadas e com alívio de peso para uso final, devido permitir a impressão de estruturas sem necessidade de qualquer material de suporte. Há uma década atrás existia uma carência grande de informações disponibilizadas em literatura sobre as propriedades mecânicas de diferentes estruturas manufaturadas a partir do processo de extrusão de material. De anos para cá este cenário vem mudando com o surgimento de comitês e empenho de organizações como a ISO e ASTM na criação de normas, regulamentações e definições de padrões para os processos aditivos [57, 74]. Outro movimento que apoia e estrutura o desenvolvimento e conhecimento das tecnologias aditivas nos últimos anos é o avanço da comunidade acadêmica sobre o tema.

Na Tabela 4 é apresentando parâmetros mecânicos dos materiais termoplásticos mais utilizado na tecnologia por extrusão de material.

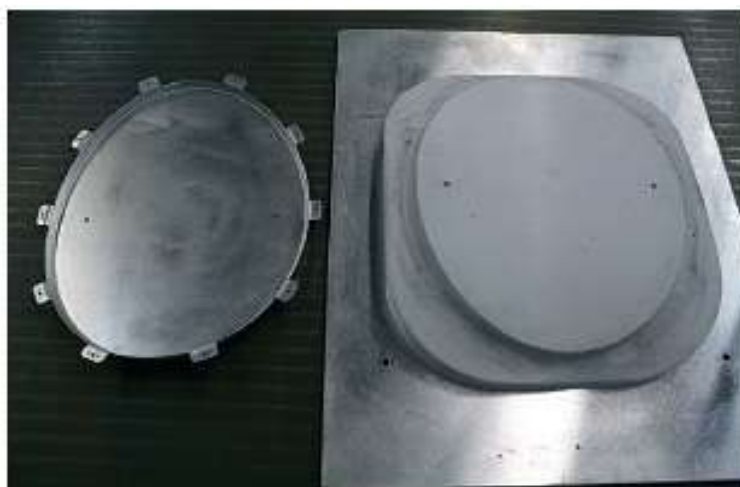
Tabela 4 - Lista de termoplásticos utilizados na MA por extrusão de material e respectivas propriedades mecânicas (adaptada)

POLÍMERO	MODULO ELASTICIDADE (E) [MPa]	LIMITE DE RESISTÊNCIA [MPa]	ELONGAÇÃO DE RUPTURA [%]
ABS	2400	28	8
PC	1944	57	4,8
PLA	3039	48	2,5
HTPLA	5650	67,4	2
PA12	1282	46	30
PA6	2232	67,6	38
TPU	15,3	16,8	552
PEI (Utem 1010)	3000	80	4
PEEK	4000	90	30
PMMA	370	-	-
Espuma Vinílica Acetinada	-	8,83	522
PC/ PEI (Utem 9085)	2510	69	5,4
ABS/ PC	1900	41	6
ABS/ SAN	1750	40	6
ABS/ TPE	1580	24	3,4
ABS/ SEBS	-	18 - 26,2	3,6 - 47,6
ABS/ UHMWPE/ SEBS	-	14,7 - 23,1	5,7 - 8,4
ABS/ PMMA	580	44,1	13,5
ABS/ PMMA/ MBS	573	43,9	17,4
PCL/ PHBV	-	15,93	-

Fonte: [48].

Recentemente vários segmentos industriais estão aderindo o processo aditivo por extrusão de material como tecnologia para fabricação de moldes e outros dispositivos, que antes eram fabricados por tecnologias subtrativas. Exemplo disso é a fabricante de aviões Piper Aircraft que validou o uso de ferramentas de conformação fabricadas aditivamente com polímero (policarbonato). Uma das ferramentas submetida a testes pode ser vista na Figura 17. Tecnicamente os dispositivos resistiram as pressões do processo de conformação dentro de um range de 20 MPa a 40 MPa, aproximadamente [21].

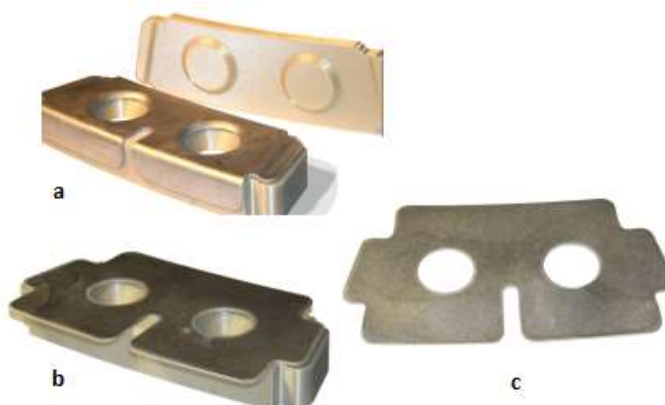
Figura 17 - Peça aeronáutica conformada por Hidroconformação de Chapas com ferramenta fabricada por Impressão 3D – tecnologia por extrusão de material



Fonte: [21].

A fabricante Stratasys, inicialmente detentora da patente da tecnologia por extrusão de material, denominada pela fabricante como FDM, elabora estudos utilizando desta tecnologia para fabricar ferramentas para o processo de Hidroconformação de Chapas. Em estudos realizados as ferramentas foram submetidas a pressões de conformação chegando até 69 MPa. Além desta aplicação os trabalhos abordados mostram a materialização de outros tipos de dispositivos e gabaritos para atividades de controle, furação, recorte e fixação de produto em diversos processos de manufatura [75]. Na Figura 18 é mostrado uma matriz utilizada no processo de Hidroconformação de Chapas com Diafragma de Borracha fabricada por tecnologia aditiva por extrusão de material e ULTEM 9085, similar a proposta deste trabalho.

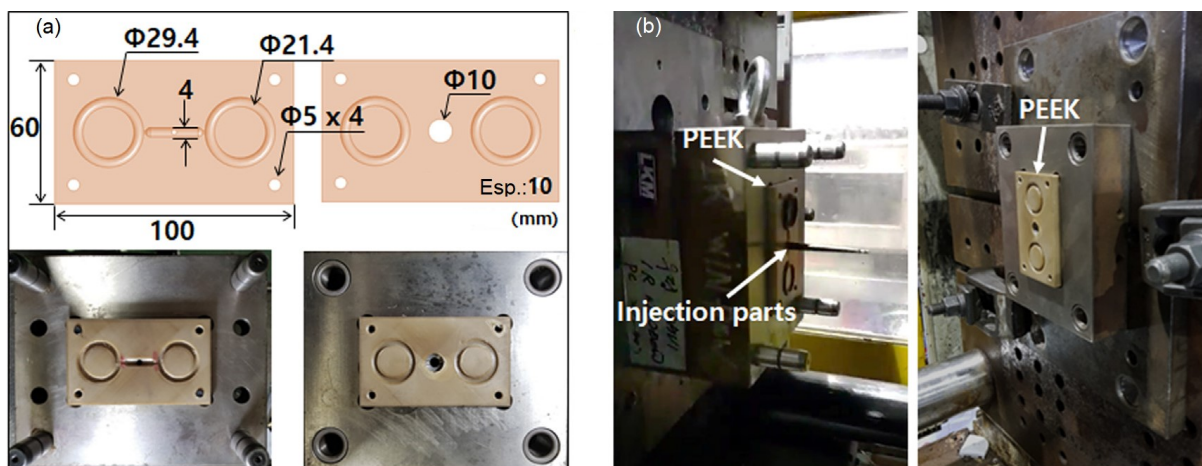
Figura 18 - Ferramenta de conformação impressa com ULTEM 9085 e tecnologia por extrusão de material: (a) ferramenta + peça conformada, (b) ferramenta + blank, (c) blank do produto (adaptada)



Fonte: [75].

Outras aplicações do processo por extrusão de material para manufatura de dispositivos e moldes vão além do uso em processos de conformação. Há evidências que a tecnologia vem sendo desenvolvida e estudada para uso nos mais variados processos de fabricação, tais como, injeção plástica, injeção metálica e fundição por silicone [76 - 78], exemplo disto pode ser visto na Figura 19, que mostra um postigo de molde de injeção fabricado por extrusão de material.

Figura 19 - Postigo de molde de injeção impresso com PEEK e tecnologia por extrusão de material: (a) projeto e molde impresso em 3D e (b) molde com parte impressa montados na máquina injetora (adaptada)



Fonte: [76].

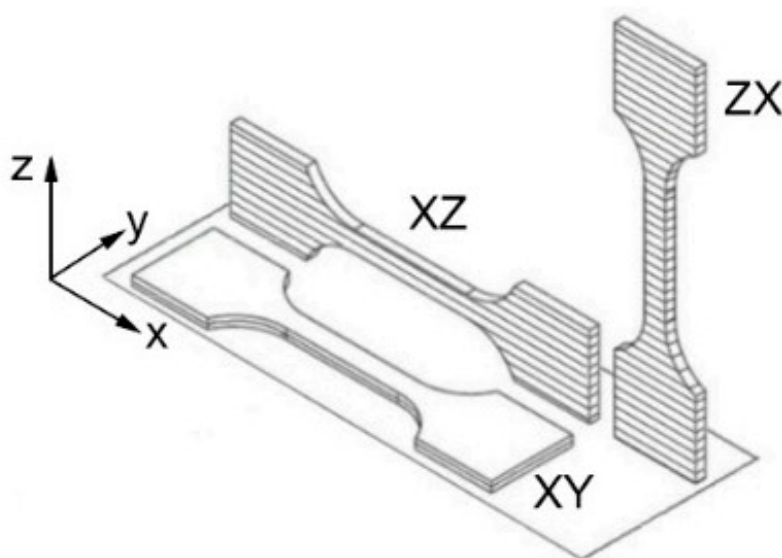
2.4.2. Anisotropia

A anisotropia, neste contexto, é definida como um material com propriedades físico mecânicas que variam a depender de sua direção, especificamente para as direções X, Y, Z. Rigidez, limite escoamento e de resistência mecânica são exemplos de propriedades que podem variar para um material anisotrópico [79].

A Manufatura Aditiva pode comprometer a resistência e rigidez de um produto final. Isto é um desafio na MA devido ao efeito da sobreposição de camadas de material que o processo tem. Considerando que o processo é de baixo para cima, cada camada que é colocada em cima não se liga completamente à camada inferior, embora a camada inferior ainda esteja parcialmente derretida, a camada acima não adere completamente, criando vazios entre cada camada impressa. Esta ocorrência pode levar a falhas ou pode aumentar a resistência do produto devido à distribuição desordenada de tensões. De forma geral isto não é uma regra, pois dependerá de qual processo aditivo e materiais são utilizados [80].

A tecnologia por extrusão de material é o processo mais difundido entre todos os processos com o conceito aditivo, tendo a anisotropia como uma característica evidente nos objetos finais fabricados. A direção de sobreposição das camadas para este processo está diretamente ligada com a orientação de impressão, logo a anisotropia de um objeto impresso por extrusão de material também estará associada a orientação de impressão [81-83]. A Figura 20 mostra as três orientações de impressão para a tecnologia por extrusão de material, definidas como orientação plana (XY), aresta (XZ) e direção Z (ZX).

Figura 20 - Orientações de impressão para o processo por extrusão de material (adaptada)



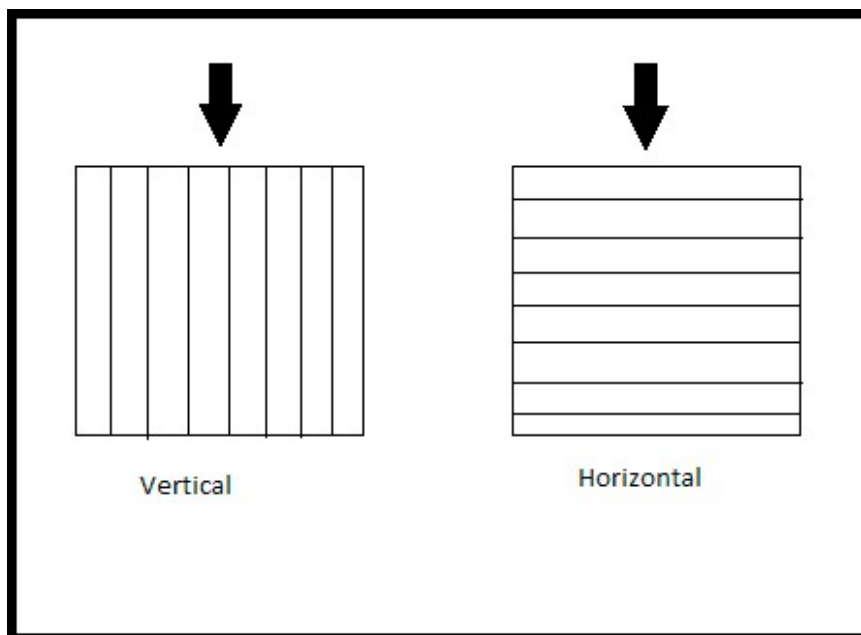
Fonte: [81].

Vários trabalhos [80, 84-86] mostram que características mecânicas de peças impressas, tais como resistência a tração, compressão, limite de escoamento e módulo de Young variam com a orientação de impressão, portanto objetos impressos em 3D por extrusão de material só podem suportar certas tensões, a depender da direção de sobreposição das camadas [82]. Exemplo disto pode ser visto na Figura 21, a posição vertical mostrada é menos resistente mecanicamente que a posição horizontal considerando a direção do esforço.

Para o processo por extrusão de material pode ser considerado que o material utilizado (filamento) é homogêneo e isotrópico, mas a estrutura geométrica formada no processo de fabricação devido a deposição e sobreposição das camadas, gera a anisotropia mecânica no

objeto final, logo a anisotropia ocorre a partir da característica do processo e não especificamente pelo material [87].

Figura 21- Aplicação de carga x direção das camadas (adaptada)



Fonte: [80].

2.4.3. Porosidade

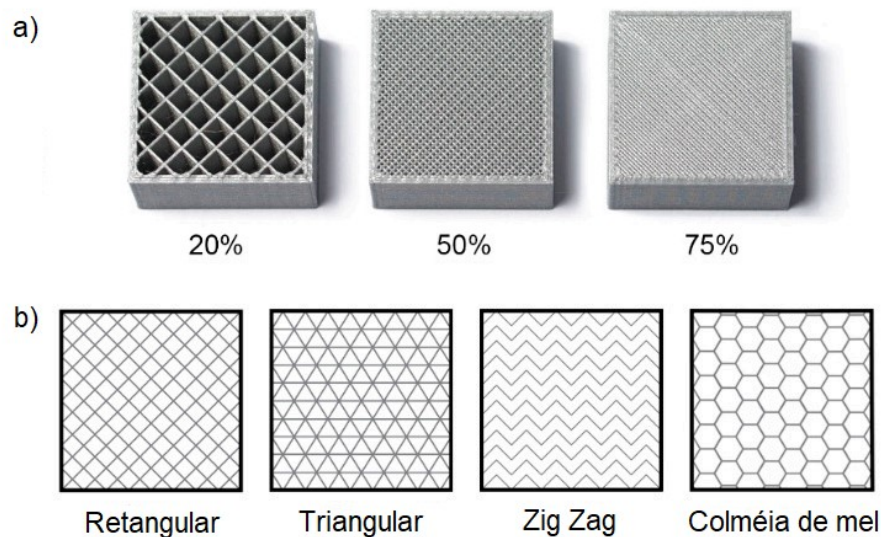
Além da orientação de impressão mencionada no item anterior, característica de porosidade é outro fator que impacta, em sua grande maioria, negativamente as propriedades mecânicas de um objeto impresso em 3D. Por outro lado a porosidade é essencial para um bom desempenho e função de um biomaterial, logo cada vez mais a MA por extrusão de material é empregada em desenvolvimentos da área médica [88].

A porosidade mencionada neste item não faz referência com os vazios gerados na sobreposição de camadas discutido no item 2.4.2, a porosidade em questão está ligada a alguns fatores do processo, tais como: configurações de preenchimento (porcentagem e tipo) e limitações do fatiadores associadas a geometria do objeto [81, 89-91]. Da mesma forma que a característica de anisotropia, a porosidade em peças impressas é mais recorrente e evidente em objetos fabricados a partir da tecnologia por extrusão de material. A Figura 22 exemplifica variações de porosidade para um mesmo objeto, a partir do uso de diferentes geometrias e quantidade de preenchimento.

Estudos mostram que o tipo e porcentagem de preenchimento, diâmetro do bico e altura de camada influenciam diretamente na porosidade final de uma peça impressa por extrusão de material. Considerando um mesmo objeto a ser manufaturado aditivamente, é possível afirmar que o grau de porosidade do produto final pode variar infinitamente devido as infinitas possibilidades de configuração para a fase de fabricação, logo, alguns autores definiram modelamentos para prever esta porosidade [91, 92]. Outros afirmam que a tomografia computadorizada de Raios X é um bom caminho para análise de porosidade em peças impressas [89].

Pode-se afirmar que a porosidade é uma característica que sempre estará presente em peças impressas por extrusão de material, pois raramente este processo utiliza de preenchimento total, não que isso não seja possível, mas eleva consideravelmente o tempo de impressão. Resumidamente pode-se afirmar que a porosidade sempre estará presente devido esta característica ser intrínseca ao processo e também devido a porosidade planejada, ligada a característica de preenchimento da peça impressa em 3D.

Figura 22 - Extrusão de material: (a) porcentagens e (b) alguns tipos de preenchimento (adaptada)



Fonte: [81].

2.5. Métodos de Elementos Finitos (MEF)

A função da análise estrutural é determinar o comportamento de uma estrutura, peça, protótipo ou outro, a partir da aplicação de esforços. O comportamento a ser avaliado pode estar ligado a tensões, deformações, esforços internos e deslocamentos para uma determinada

condição de carregamento. Em sua grande utilização, este tipo de análise tem caráter preditivo, de validação e análise de falhas [93].

As modelagens de estruturas mecânicas podem ser feitas em modelos bi e tridimensionais. Com o aprimoramento das ferramentas e softwares de análise por elementos finitos, grande parte dos estudos passaram a ser avaliados através de modelos tridimensionais, os quais são muito mais eficientes e próximos das condições reais. Esta aplicação se dá em casos que a análise de modelos bidimensionais é de difícil representação. Para execução da análise por elementos tridimensional faz necessário o uso do modelo 3D do que se quer avaliar, além de haver a possibilidade de incluir mais detalhes do problema a ser avaliado [94].

O MEF avalia o comportamento mecânico de uma peça, objeto ou algo similar, que é a reação do material sob a condição de esforço mecânico. Dependendo da direção da força aplicada, das propriedades mecânicas, do tamanho e da geometria do item, é provocado uma deformação no material [43].

Utilizar deste tipo de análise para objetos manufaturados aditivamente ainda é um grande desafio, principalmente quando a tecnologia utilizada é por extrusão de material. Conforme discutido anteriormente, qualquer tecnologia inserida no conceito da MA tem por característica a deposição de camadas planas sucessivas, logo a característica mecânica nas regiões de adesão entre camadas ainda não é tão esclarecida, principalmente para a tecnologia por extrusão de material. As colocações anteriores levam a característica de anisotropia já discutida no item 2.4.2. Os desafios para usar o MEF aumentam ainda mais para objetos impressos por extrusão de material devido a porosidade discutida no item 2.4.3. Desta forma há autores [82, 95] que desconsideram a característica anisotrópica em simulações por elementos finitos para objetos manufaturados aditivamente. Já outros autores propõem o MEF em objetos impressos em 3D considerando a porosidade de forma subjetiva no modelo 3D [80]. Há estudos em que pesquisadores modelam métodos mais precisos para o uso do MEF, considerando rigidamente parâmetros que não devem ser descartados e que trazem maior assertividade nos resultados [83]. Desafios secundários no uso de MEF para objetos impressos em 3D são a falta de informações (parâmetros anisotrópicos) para a grande gama de materiais utilizados e softwares capazes de gerar bons cálculos para a condição anisotrópica.

2.6. Medição Tridimensional

O processo de medição ou atividade metrológica sempre está ligado ao ato de medir, ou mensurar algo. Na indústria este processo é bastante custoso, porém fundamental para avaliar

o nível de robustez de um processo e o estado de conformidade do produto. Muitas indústrias incluem a medição em massa em seus planos de controles, esta estratégia é justificada por variações nos produtos fabricados. O controle da qualidade pode ser realizado preventivamente no processo ou diretamente para as características chaves do produto. Planos de controle incluem estas características e outras de relevância seja do produto ou do processo. Exemplo disso são características dimensionais e geométricas, massa, imperfeições superficiais e de ensaios diversos [96].

Atualmente há vários sistemas de medição disponíveis e utilizados para controle de produto e processo, um deles e bastante conhecido é o paquímetro, que é definido como um sistema de medição convencional e muito utilizado para medição direta de características dimensionais com exigências de tolerâncias mais brandas. Outros sistemas de medição convencionais também muito utilizados são micrômetros, medidores de altura e relógios comparadores. Sistemas de medição mais sofisticados são utilizados para avaliação de itens com níveis de controles mais altos (tolerâncias apertadas), com características geométricas e com controle de tolerância aplicado (Dimensionamento Geométrico e Toleranciamento - GD&T). Exemplo destes tipos de solução metrológicas são máquinas de medir por coordenadas, máquinas de medir ópticas, sistemas de medição óptico portáteis, máquinas de medir com múltiplos sensores, braços articulados de medição e tomógrafo computadorizado para metrologia industrial [97].

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho utiliza do conceito de Prototipagem Rápida, especificamente com o uso da tecnologia de extrusão de material baseado na MA, para fabricar ferramentas de conformação empregadas na Hidroconformação de Chapas com diafragma de borracha. A proposta de utilizar a MA como conceito de fabricação final para as ferramentas de conformação torna este processo uma alternativa de manufatura e propõe substituição do processo convencional comumente utilizado e conhecido como usinagem CNC.

A essência fundamental deste trabalho é avaliar a estabilidade dimensional, a partir do desempenho mecânico, de dois corpos de provas similares às ferramentas de conformação, cada um manufaturado por uma tecnologia de fabricação e pertencentes à dois conceitos distintos de manufatura (Manufatura Subtrativa x Manufatura Aditiva).

O objetivo deste item é apresentar detalhadamente os materiais utilizados e suas respectivas características, o planejamento do estudo, as medições, os testes realizados e o método de análise para conclusão deste estudo.

3.1. Materiais

Os materiais utilizados neste estudo são a liga polimérica ULTEM 9085 e a liga metálica AA 7050-T7 451. Tais materiais foram definidos devido seu histórico dentro dos processos de fabricação abordados neste estudo.

3.1.1. Liga AA 7050-T7 451

As ligas 7X50 nas têmperas T7X apresentam uma combinação favorável de propriedades. Estas ligas apresentam alta resistência mecânica, alta resistência à corrosão sob tensão, e quando submetidas a tratamentos térmicos e mecânicos especiais apresentam alta resistência ao crescimento instável de trincas, ou seja, possui bom desempenho (tenacidade) à fratura. Somado aos tratamentos térmicos os elementos de ligas são os principais influenciadores nas propriedades das ligas [98, 99].

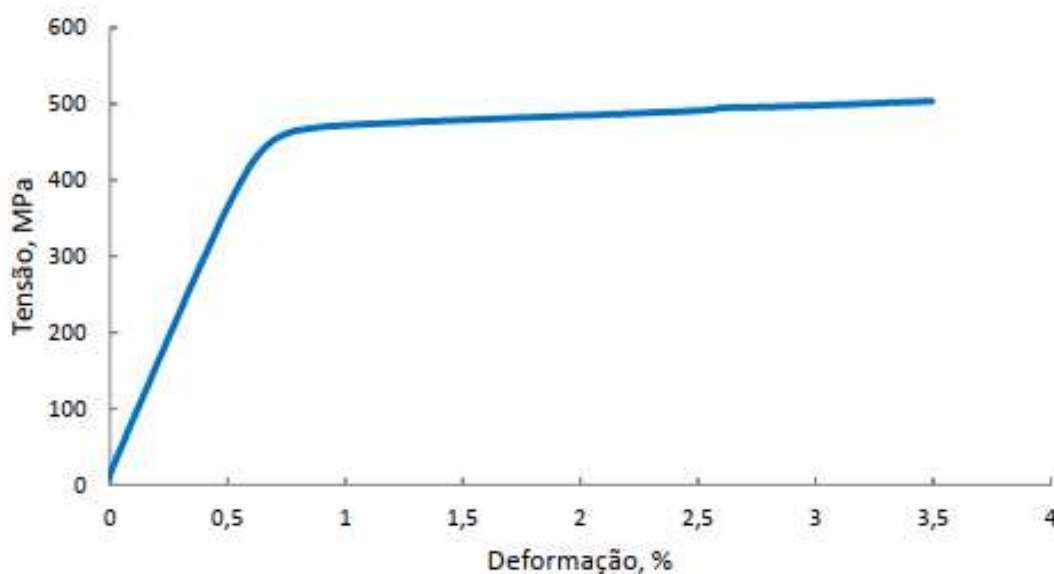
Segundo a SAE Internacional a composição química da liga AA 7050-T7 451 é:

- Composição química (% em massa): AlZnCuMgZr
 - Al: 87,3 a 90,3%;
 - Zn: 5,7 a 6,7%;
 - Cu: 2 a 2,6%;

- Fe: máx. de 0,15%;
- Si: máx. de 0,12%;
- Zr: 0,08 a 0,15%;
- Mn: máx. de 0,1%;
- Ti: máx. de 0,06%;
- Cr: máx. de 0,04% [30].

Na Figura 23 é mostrado o diagrama Tensão x Deformação do material AA 7050-T7 451.

Figura 23 - Diagrama Tensão x Deformação da liga AA 7050-T7 451



Fonte: [100].

A liga AA 7050-T7 451 utilizada foi importada (Alemanha), produzida na forma de placa (fundida e laminada a quente). Tecnicamente a escolha por esta liga se deu devido seu elevado nível de resistência mecânica, sendo importante para este estudo as características de resistência a tração/ compressão, além do material ter boa usinabilidade. Considerando que parte deste estudo foi avaliar o desempenho mecânico das ferramentas de conformação (Hidroconformação de Chapas) fabricadas pelo processo convencional, é indispensável utilizar do mesmo material já empregado na fabricação destas ferramentas, que em sua maioria é a liga AA 7050-T7 451. As dimensões iniciais da matéria bruta utilizada eram de 350 mm x 200 mm x 60 mm.

Na Tabela 5 é mostrado as características físicas e mecânicas da liga de alumínio.

Tabela 5 - Características físicas e mecânicas da liga AA 7050-T7 451

PROPRIEDADES FÍSICAS – MECÂNICAS: AA 7050-T7 451	
<i>Densidade [g/ cm³]</i>	2,83
<i>Coefficiente de expansão térmica linear [um/m. °C]</i>	21,1
<i>Condutividade térmica [W/m. °C]</i>	157
Limite de resistência à tração [MPa]	525
Limite de escoamento [MPa]	470
Elongação de ruptura [%]	11
Módulo de elasticidade [GPa]	72
Dureza - Brinell (carga de 500 Kg e esfera de 10 mm) [HB]	140

Fonte: [101].

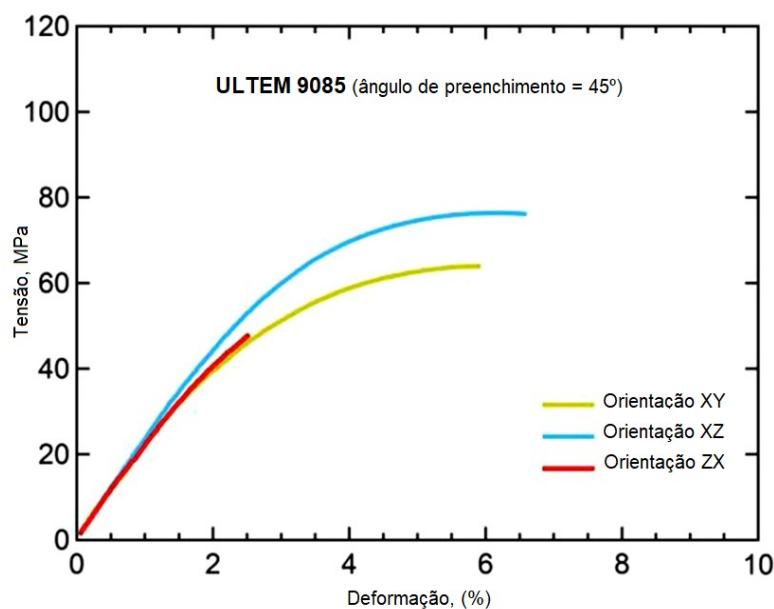
3.1.2. ULTEM 9085

O material plástico utilizado neste estudo como matéria prima do processo aditivo foi o ULTEM 9085 na forma de filamento, com diâmetro de 1,78 mm e fabricado pela Sabic Innovative Plastics. Este material é uma liga polimérica composta por poli(éter-imida) (PEI) e um copolímero de policarbonato proprietário, que possui ótimas propriedades mecânicas e térmicas. Características como a resistência mecânica, rigidez e alta temperatura de transição vítrea o torna adequado para uso em várias aplicações estruturais, como interior de aeronaves e automóveis. Também é usado na fabricação de postigos para molde em aplicações de moldagem por injeção [83]. Para este trabalho o ULTEM 9085 foi o material proposto para substituir a liga de alumínio empregada no processo convencional de fabricação das ferramentas de conformação (Hidroconformação de Chapas) devido seu alto desempenho a esforços de tração/compressão e ser de fácil processabilidade em equipamentos industriais empregados no processo aditivo por extrusão de material.

Dentro dos processos aditivos industriais com tecnologia por extrusão de material, o ULTEM 9085 é um material bastante empregado para fabricação de peças de uso final. A temperatura da câmara e da mesa de impressão para este material é estabilizada em valores entre 160 °C e 195 °C, dessa forma a impressão acontece na temperatura ambiente com a temperatura da câmara de impressão, sendo próximo ou acima da temperatura de transição do ponto vítreo do polímero ($T_g = 181\text{ °C}$). A temperatura de extrusão para este material pode variar entre 330 °C a 380 °C [43, 48].

Na Figura 24 é mostrado o diagrama Tensão x Deformação do material ULTEM 9085 para as três orientações de impressão, empregando a tecnologia por extrusão de material.

Figura 24 - Diagrama Tensão x Deformação do ULTEM 9085 (adaptada)



Fonte: [102].

Dentre todos os materiais disponíveis para o processo de impressão 3D por extrusão de material, o ULTEM 9085 foi o escolhido como matéria prima a ser estudada e utilizada, devido suas elevadas propriedades mecânicas, baixa densidade e facilidade de impressão.

Na Tabela 6 é mostrado as características físicas e mecânicas da liga polimérica.

Tabela 6 - Características físicas e mecânicas da liga ULTEM 9085

PROPRIEDADES FÍSICAS – MECÂNICAS: ULTEM 9085	
Densidade [g/cm ³]	1,27*
Coeficiente de expansão térmica linear [um/m.°C]	65,27
Condutividade térmica [W/m.°C]	0,0697
Limite de resistência à tração[MPa] (orientação XY)	67
Limite de escoamento [MPa] (orientação XY)	38
Elongação de ruptura [%] (orientação XY)	7
Módulo de elasticidade [GPa] (orientação XY)	2,33
Dureza - Brinell (carga de 500 Kg e esfera de 10 mm) [HB]	-

* A densidade foi pesquisada em várias fontes e encontrado valores entre 1,27 g/cm³ e 1,34 g/cm³

Fonte: [103-105].

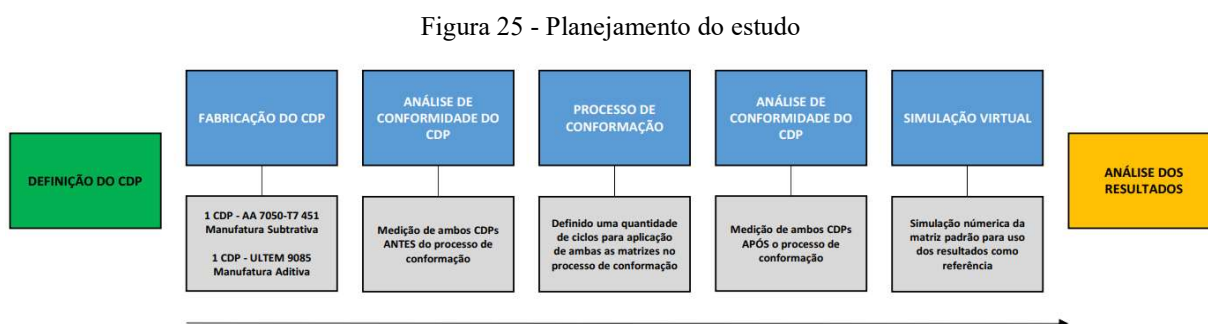
O material ULTEM 9085 utilizado neste trabalho é da marca Stratasys, empresa mundialmente reconhecida pela venda e desenvolvimento de equipamentos aditivos industriais e materiais de alta performance para tecnologia de extrusão de material. Todas as matérias primas utilizadas neste tipo de tecnologia possuem a forma de filamento. Em específico para equipamentos de impressão da Stratasys, os diâmetros dos filamentos são de 1,78 mm, dimensional específico e proprietário da marca.

3.2. Método

Neste tópico será descrito a metodologia empregada neste estudo para análise do comportamento mecânico da ferramenta manufaturada por Prototipagem Rápida e também o desempenho das ferramentas nas suas configurações convencionais de matéria prima e manufatura.

3.2.1. Planejamento do estudo

Como forma de organizar e mitigar possíveis falhas neste estudo, o presente trabalho teve como ponto inicial definir as fases de desenvolvimento e execução. Na Figura 25 é mostrado o fluxograma de planejamento e direcionamento do estudo.



Fonte: Autor.

3.2.2. Preparação das ferramentas de prova

Neste estudo foram fabricados dois corpos de prova para ensaios, denominados como FERRAMENTA I e FERRAMENTA II, conforme mostra a Tabela 7. A FERRAMENTA I mantém as características convencionais de manufatura e material já empregados para este tipo de ferramenta. Sua fabricação foi a partir do processo de usinagem com equipamento

computadorizado (CNC) 3 eixos. Para a FERRAMENTA II foi proposto fabricação com tecnologia por extrusão de material e matéria prima conhecida comercialmente como ULTEM 9085.

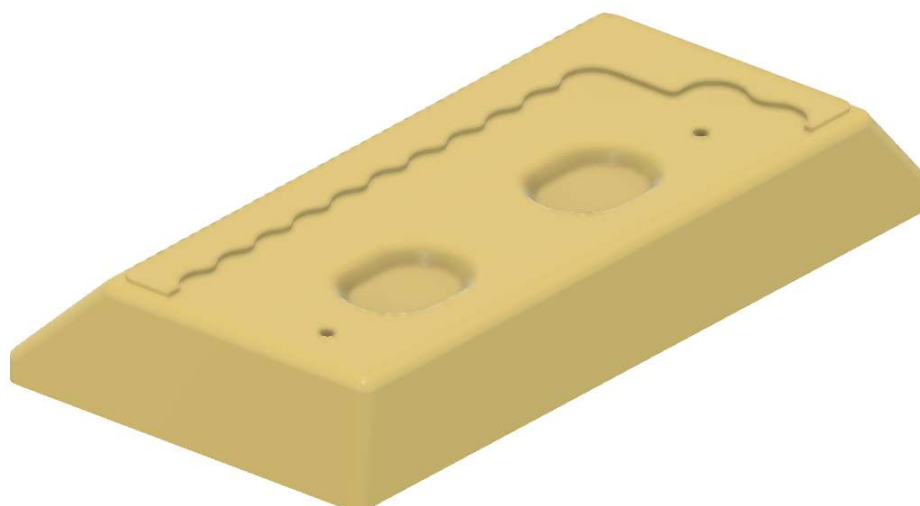
Tabela 7 - Características dos corpos de prova: descrição, manufatura e material

DENOMINAÇÃO	CONCEITO DE FABRICAÇÃO	TECNOLOGIA DE FABRICAÇÃO	MATERIAL
CDP: FERRAMENTA I	Subtrativo	Usinagem CNC (3 eixos)	AA 7050 T7 451
CDP: FERRAMENTA II	Aditivo	Extrusão de material baseado na MA (FDM)	ULTEM 9085

Fonte: Autor.

Para ambas ferramentas de prova manteve-se as mesmas geometrias, garantindo a padronização e diminuindo possíveis variáveis neste estudo. Foram considerados para ambos corpos de prova as características padrões de uma ferramenta utilizada no processo de conformação tratado neste estudo. Isto tem por objetivo aproximar ao máximo os corpos de prova das ferramentas já utilizadas no processo industrial de Hidroconformação de Chapas com Diafragma de Borracha. Na Figura 26 pode-se ver o modelo 3D utilizado na fabricação da FERRAMENTA I e FERRAMENTA II.

Figura 26 - Modelo 3D das ferramentas de prova



Fonte: Autor.

Na fabricação da FERRAMENTA II foi utilizado de uma impressora industrial modelo Fortus 400mc da fabricante Stratasys (volume de impressão de 355 mm x 254 mm x 254 mm) e seu software de fatiamento conhecido por Insight. Como o objetivo deste trabalho não é avaliar o comportamento mecânico de diversos corpos de provas com diferentes configurações de impressão, foi definido para a FERRAMENTA II uma única configuração de fabricação.

O processo aditivo utilizado possui característica industrial, logo as configurações de largura e altura das camadas são pré-definidas pelo fabricante de acordo com o bico de extrusão (“tip”) utilizado no processo de impressão 3D. Os valores pré-definidos de ambas as configurações podem variar dentro de um intervalo (especificado também pelo fabricante) a depender do material a ser utilizado [106]. As configurações básicas de impressão utilizadas neste trabalho são mostradas na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros utilizados no processo de impressão 3D para a FERRAMENTA II

PARÂMETROS DE IMPRESSÃO: FERRAMENTA II	
Largura da camada:	0,508 mm (T16 tip)
Número de paredes:	3
Altura da camada:	0,2540 mm (T16 tip)
Preenchimento:	Sólido – Normal (100% preenchido)

Fonte: Autor.

3.2.3. Medição tridimensional das ferramentas de prova

Após a manufatura de ambas as ferramentas de prova, fez-se medidas tridimensionais em cada uma delas. As regiões de medição foram pré-definidas levando em consideração as regiões que potencialmente deveriam ter maior controle dimensional, ou seja, regiões com tolerâncias mais apertadas. No total foram definidas cinco regiões de medição e atribuído características de controles para cada uma delas. Estas características foram associadas com três superfícies e dois furos do projeto 3D. As regiões de medição e as características de controle definidas foram as mesmas para ambas as ferramentas de prova. A Figura 27 apresenta as cinco regiões e respectivas características medidas, tanto para a FERRAMENTA I quanto para a FERRAMENTA II. Para as três superfícies medidas foram definidos uma quantidade respectiva de pontos de medição e para efeito deste estudo foi avaliado o ponto com maior desvio, que é o desvio normal a superfície medida. Já para os dois furos, ambos também tiveram uma quantidade de pontos de medição definidos e os desvios avaliados foram as respectivas posições

em relação a posição zero definida em projeto. Todos os resultados apresentados nas medições foram calculados com uso de software e baseado no modelo 3D das ferramentas de prova.

Para qualquer processo de medição tridimensional com avaliação de características geométricas (superfície, furo e outras) faz necessário ter o modelo 3D do item a ser mensurado e as referências de medição definidas para comparação dos valores medidos com os respectivos valores nominais de projeto. Na Tabela 9 e Figura 27 são mostradas as características, quantidade de pontos e regiões a serem avaliadas nas ferramentas de prova.

Tabela 9 - Características de controle no processo de medição tridimensional

TIPO DE GEOMETRIA	TIPO DE CONTROLE	NOMENCLATURA	QTDD DE PONTOS MEDIDOS
Superfície	Forma e posição	CARACTER1	30
Superfície	Forma e posição	CARACTER2	34
Superfície	Forma e posição	CARACTER3	21
Furo	Posição	CARACTER4	6 (inclui projeção no plano)
Furo	Posição	CARACTER5	6 (inclui projeção no plano)

Fonte: Autor.

Os objetivos são mensurar em um primeiro momento a variação de ambas as ferramentas de prova em relação ao seu estado de projeto, ou seja, mensurar desvios provenientes dos processos de manufatura. Na sequência, em um segundo momento foi comparado os resultados desta primeira medição com os resultados das medições realizadas após a fase de ensaios na prensa com diafragma de borracha. Nesta segunda avaliação foi possível quantificar desvios entre o estado inicial e final das ferramentas de prova, ou seja, antes e depois dos ensaios, sendo os resultados desta avaliação as deformidades (deformação plástica) oriundas dos esforços aplicados no processo de conformação, especificamente na fase de ensaios.

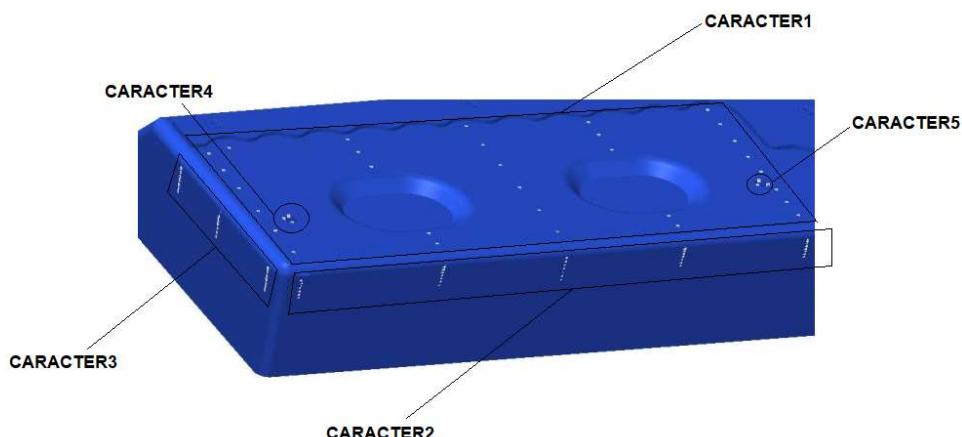
Pode-se ver na Tabela 10 a quantidade total de medições para o estudo, que será quatro, sendo duas para a FERRAMENTA I e duas para a FERRAMENTA II.

Tabela 10 - Quantidade de medições tridimensionais realizadas no estudo

MATRIZ DE MEDIÇÃO		
CORPO DE PROVA	Qtdd medição (antes do ensaio)	Qtdd medição (depois do ensaio)
FERRAMANTA I	1	1
FERRAMENTA II	1	1

Fonte: Autor.

Figura 27 – Características de controle e respectivas regiões medidas nas ferramentas de prova



Fonte: Autor.

O sistema de medição utilizado neste trabalho foi uma máquina tridimensional MMC (Máquina de Medição por Coordenadas) da fabricante DEA, modelo Global Advantage e volume de medição 0,9 m x 2 m x 0,8 m, como pode ser observada na Figura 30. O software de medição utilizado foi o PolyWorks Inspector.

A análise da FERRAMENTA I e FERRAMENTA II, antes e depois dos ensaios, serão feitas visualmente, além da medição tridimensional.

3.2.4. Ensaios: FERRAMENTA I e FERRAMENTA II

Na sequência da metodologia deste estudo, após a primeira medição das ferramentas de prova, as mesmas serão ensaiadas no processo de conformação para assim ter como referência o desempenho mecânico da FERRAMENTA I e a partir disso avaliar o comportamento mecânico da FERRAMENTA II, fabricada por Manufatura Aditiva.

Inicialmente propõe-se duas análises, a primeira será a avaliação da deformidade e desempenho mecânico das ferramentas de prova antes e depois dos ensaios de forma separada. A segunda análise será a comparação de deformidade entre elas. Esta última avaliará a deformidade da FERRAMENTA II em relação à deformidade da FERRAMENTA I. Isto foi definido, pois a FERRAMENTA I representa a solução atual e já utilizada no processo de Hidroconformação de Chapas com diafragma de borracha.

Os ensaios foram realizados em uma prensa com célula hidráulica similar à mostrada na Figura 28 com capacidade máxima de pressão igual a 100 MPa. Para os ensaios propostos neste trabalho a pressão de trabalho irá variar de 34 MPa a 41 MPa, aproximadamente.

O número pré-definido de ciclos de conformação para a fase de ensaio foi de 500 (quantidade planejada). Esta quantidade poderá ser maior, a depender da disponibilidade do equipamento (prensa) que será utilizado nos ensaios. Cada ciclo foi definido como uma prensagem em cada ferramenta de prova, mantendo as condições reais de trabalho e de pressão para conformação, que é entre 34 MPa a 41 MPa, aproximadamente.

Figura 28 - Prensa com diafragma de borracha similar a empregada na execução dos ensaios



Fonte: [14].

O posicionamento das ferramentas de prova dentro da prensa para execução dos ensaios foi feito em similaridade ao que é mostrado na Figura 7 (b), única diferença que nos ensaios realizados para este estudo não serão conformadas peças, ou seja, as ferramentas sofrerão os esforços do processo sem conformação de produto, ou seja, as ferramentas de prova não terão posicionamento de blank (chapa a ser conformada).

3.2.5. Análise de porosidade: FERRAMENTA I e FERRAMENTA II

Conforme discutido na revisão bibliográfica, objetos manufaturados aditivamente possuem porosidade, agravando esta característica ao usar da tecnologia por extrusão de

material. Considerando que a FERRAMENTA II foi manufaturada com 100% de preenchimento. A partir disso, estima-se que a porosidade instaurada seja muito baixa tendendo a não ter porosidade, porém para aumentar a assertividade e discussões deste estudo, foi proposto um método para avaliar se realmente há ou não porosidade na FERRAMENTA II. É sabido que na aderência das camadas há potenciais falhas gerando vazios, além de haver pequenas possibilidades de falhas na extrusão do material durante o processo de fabricação. Devido estes potenciais riscos será proposto a análise de porosidade, mesmo sabendo que a FERRAMENTA II possui preenchimento de 100%. Por outro lado, a FERRAMENTA I é isotrópica e manufaturada a partir de uma matéria prima bruta e maciça, de igual forma que a FERRAMENTA II, pode-se pensar que a porosidade é muita baixa. Seguindo a mesma metodologia, ambas as ferramentas de prova tiveram o nível de porosidade avaliadas.

De forma simples o método proposto para análise de porosidade consiste via software CAD estratificar ambas as massas das FERRAMENTA I e FERRAMENTA II. Este cálculo será realizado a partir da relação $d \text{ (densidade)} = m \text{ (massa)} / v \text{ (volume)}$. O volume será do modelo 3D utilizado na fabricação das ferramentas de prova e as densidades serão inseridas no software de acordo com cada material, conforme informações das Tabelas 5 e 6. O resultado final desta etapa será a massa, definida como massa teórica (m_t) de cada ferramenta de prova.

As massas reais (m_r) das FERRAMENTA I e FERRAMENTA II foram mensuradas a partir da pesagem com o uso de uma balança (fabricante: Brisa, modelo: digital e precisão: 1/3000 F.S.). A medição da massa foi repetida cinco vezes para cada ferramenta de prova. O resultado da diferença entre a massa teórica (m_t) e massa real (m_r) transformada em porcentagem da massa teórica será o resultado da porosidade.

O software CAD utilizado foi o Autodesk Fusion 360.

3.2.6. MEF: FERRAMENTA I e FERRAMENTA II (Carga Estática)

Como proposta de previsibilidade dos resultados dos ensaios da FERRAMENTA I e FERRAMENTA II, foi realizado simulações numéricas por elementos finitos do tipo estática para ambas as ferramentas de prova. Os resultados obtidos na simulação foram comparados com os resultados dos ensaios obtido a partir das fases de medições. Caso haja proximidade nas deformações de ambas as análises (simulação e ensaio mais medições) poderá ser proposto para trabalhos futuros um modelamento de MEF para avaliar a estabilidade dimensional de ferramentas de conformação manufaturadas aditivamente, sem que faça necessário ensaios físicos, conforme abordado no item 3.2.4. Além de propor a comparação dos resultados, este

item visa apresentar outros métodos de avaliação mecânica através da análise por elementos finitos.

As análises por elementos finitos serão realizadas a partir do modelo 3D das ferramentas de prova. Na simulação numérica da FERRAMENTA I será utilizado das propriedades mecânicas da liga AA 7050-T7 451 descritas na Tabela 5, que são informações precisas e de suma importância quando se trata de análise estrutural, pois estas propriedades são relevantes para obter resultados fiéis a realidade no que diz respeito à simulação estática [24]. A ferramenta metálica será tratada como isotrópica. Para a FERRAMENTA II, considerando o processo de fabricação utilizado, a mesma terá característica final anisotrópica, que aumenta as variáveis e desafios para representar esta condição na simulação estática. Sabendo disso e que o software CAD utilizado possui restrições para simulação com material anisotrópico, algumas premissas foram definidas para o MEF da FERRAMENTA II. Ver abaixo:

1. A ferramenta aditiva foi impressa na orientação XY, logo os valores do limite de escoamento, do limite de resistência mecânica e do módulo de elasticidade para a simulação virtual serão de acordo com esta orientação de impressão, que estão mostrados na Tabela 6;
2. O software utilizado para o MEF possui limitações e não há material com característica anisotrópica. Sabendo que o preenchimento da FERRAMENTA II é de 100%, definiu-se realizar o MEF na condição isotrópica, porém com os parâmetros mecânicos da orientação de impressão XY;
3. A carga utilizada nas simulações será a de maior utilizada nos ensaios, que é 41,37 MPa.

O software utilizado para execução e processamento das simulações estáticas foi o Autodesk Fusion 360. Todas as informações a serem inseridas no software serão baseadas nas propriedades dos materiais, conforme informado anteriormente.

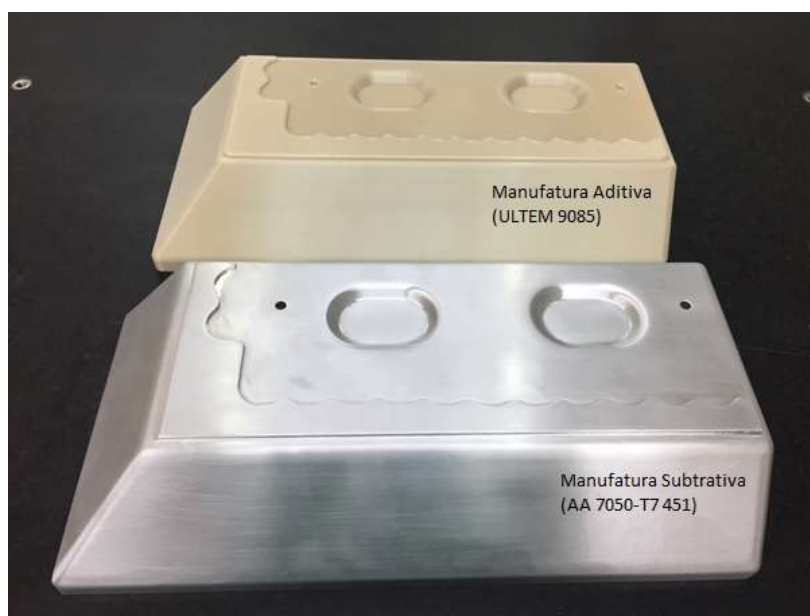
Para garantir qualidade e assertividade nos resultados das simulações, as mesmas serão realizadas garantindo que as informações inseridas no software Fusion 360 estejam o mais próximo das condições reais dos ensaios, seja para os parâmetros de esforços quanto para as características mecânicas dos materiais empregados na fabricação das FERRAMENTA I e FERRAMENTA II.

4. RESULTADOS

4.1. FERRAMENTA I e FERRAMENTA II

Neste subitem são mostradas ambas as ferramentas de prova fabricadas para fases de medições e ensaios, conforme proposto no estudo. A Figura 29 apresenta a FERRAMENTA I e FERRAMENTA II.

Figura 29 – Ferramentas de prova do estudo



Fonte: Autor.

4.2. Medição Tridimensional - Antes do Ensaio

Seguindo a metodologia do estudo ambas as ferramentas de prova foram medidas antes e depois da fase de ensaio. Neste subitem são apresentados apenas os resultados das medições da FERRAMENTA I e FERRAMENTA II antes da fase de ensaio.

Todos os resultados mostrados na Tabela 11 foram mensurados na unidade de milímetros (mm) e refletem para cada superfície o maior desvio normal apresentado entre todos os pontos medidos para cada característica. Para os furos os valores apresentados refletem os respectivos desvios das posições em relação aos valores nominais definidos em projeto.

Os desvios apresentados para ambas ferramentas de prova antes da fase de ensaio representam o estado de conformidade das mesmas após as respectivas manufaturas, podendo

afirmar que os valores dos desvios estão associados com os respectivos processos de fabricação, ou seja, são variações decorrente dos processos.

A Figura 30 mostra o processo de medição tridimensional realizado para a FERRAMENTA II.

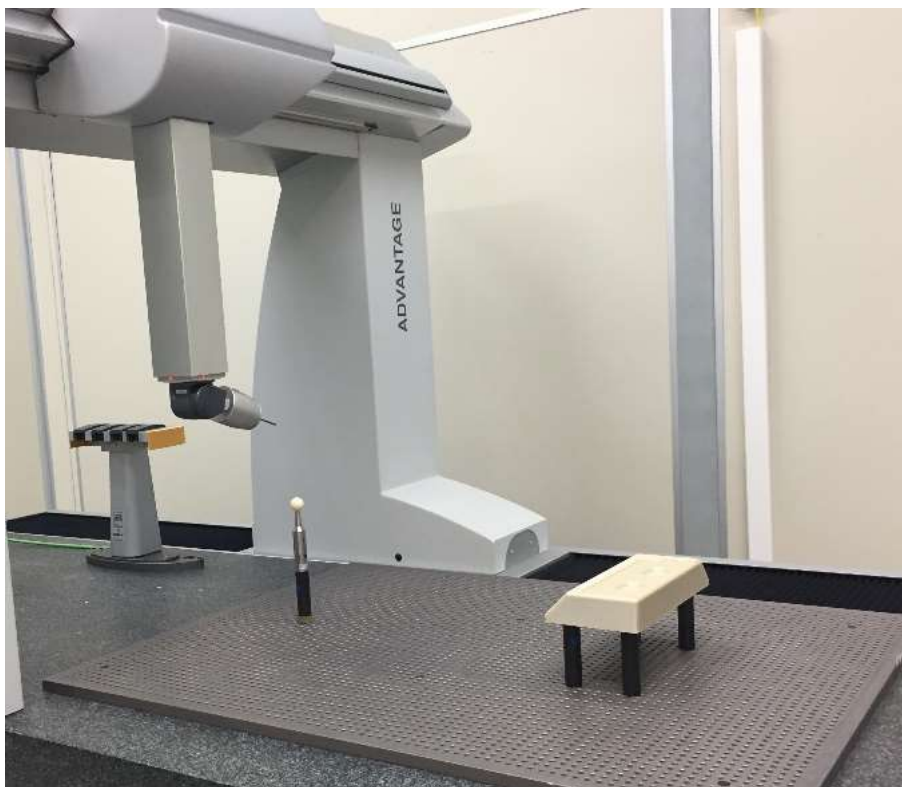
Os resultados das medições foram padronizados com três casas decimais após a vírgula.

Tabela 11 - Resultados das medições das ferramentas antes dos ensaios

RESULTADOS DAS MEDIÇÕES - Antes dos Ensaios		
CARACTERÍSTICAS	FERRAMENTA I	FERRAMENTA II
CARACTER1 (superfície)	-0,032	-0,050
CARACTER2 (superfície)	0,085	-0,290
CARACTER3 (superfície)	0,050	-0,120
CARACTER4 (furo)	0,070	0,270
CARACTER5 (furo)	0,170	0,810

Fonte: Autor.

Figura 30 - Execução da medição da FERRAMENTA II antes da fase de ensaio



Fonte: Autor.

4.3. Ensaios

Os ensaios com as ferramentas de prova no processo de Hidroconformação de Chapas com Diafragma de Borracha foram realizados de acordo com o método descrito no item 3.2.4. Inicialmente definiu-se a quantidade mínima de 500 ciclos de conformação para as FERRAMENTA I e FERRAMENTA II. No decorrer do estudo foi possível atingir quase o dobro do número de ciclos pré-definido. A quantidade final de ciclos realizados foi de 958.

Ambas as ferramentas de prova durante a execução dos ensaios foram ensaiadas juntas, na mesma quantidade de ciclos/ dia e com os mesmos valores de esforços exercidos pela célula hidráulica. Nas Tabelas 12 e 13 são mostrados os formulários preenchidos com as informações de cada ferramenta de prova durante os ensaios. Neste documento é informado a quantidades de ciclos/ dia e valores das pressões utilizadas. Nota-se que os valores das pressões variaram entre 34 MPa a 41 MPa, aproximadamente.

Tabela 12 - Formulário de teste preenchido para a FERRAMENTA I

Material: AA 7050-T7 451					
ANOTAÇÕES E RESULTADOS DOS ENSAIOS - FERRAMENTA I					
Data da conformação (ensaio)	Quantidade de ciclos	Pressão [MPa]	Ferramenta trincada?	Ferramenta quebrada?	OBSERVAÇÃO
21-fev-17	30	34,47	Não	Não	
22-fev-17	45	41,37	Não	Não	
23-fev-17	104	34,47	Não	Não	
24-fev-17	98	34,47	Não	Não	
2-mar-17	62	41,37	Não	Não	
3-mar-17	30	41,37	Não	Não	
6-mar-17	45	34,47	Não	Não	
7-mar-17	51	41,37	Não	Não	
8-mar-17	30	41,37	Não	Não	
9-mar-17	20	34,47	Não	Não	
10-mar-17	101	41,37	Não	Não	
13-mar-17	18	41,37	Não	Não	
14-mar-17	27	41,37	Não	Não	
15-mar-17	20	41,37	Não	Não	
16-mar-17	102	41,37	Não	Não	
17-mar-17	38	34,47	Não	Não	
21-mar-17	56	41,37	Não	Não	
22-mar-17	81	41,37	Não	Não	
Nº total ciclos:		958			

Fonte: Autor.

Tabela 13 - Formulário de teste preenchido para a FERRAMENTA II

Material: ULTEM 9085					
ANOTAÇÕES E RESULTADOS DOS ENSAIOS - FERRAMENTA II					
Data da conformação (ensaio)	Quantidade de ciclos	Pressão [MPa]	Ferramenta trincada?	Ferramenta quebrada?	OBSERVAÇÃO
21-fev-17	30	34,47	Não	Não	
22-fev-17	45	41,37	Não	Não	
23-fev-17	104	34,47	Não	Não	
24-fev-17	98	34,47	Não	Não	
2-mar-17	62	41,37	Não	Não	
3-mar-17	30	41,37	Não	Não	
6-mar-17	45	34,47	Não	Não	
7-mar-17	51	41,37	Não	Não	
8-mar-17	30	41,37	Não	Não	
9-mar-17	20	34,47	Não	Não	
10-mar-17	101	41,37	Não	Não	
13-mar-17	18	41,37	Não	Não	
14-mar-17	27	41,37	Não	Não	
15-mar-17	20	41,37	Não	Não	
16-mar-17	102	41,37	Não	Não	
17-mar-17	38	34,47	Não	Não	
21-mar-17	56	41,37	Não	Não	
22-mar-17	81	41,37	Não	Não	
Nº total ciclos:		958			

Fonte: Autor.

4.4. Medição Tridimensional - Antes e Depois do Ensaio

Após a fase de ensaio ambas ferramentas de prova foram medidas para assim avaliar qualquer tipo de variação (deformidade) na estrutura das mesmas ocasionado pelos esforços empregados. As cargas aplicadas nos ensaios representaram as condições reais do processo de Hidroconformação de Chapas com Diafragma de Borracha.

Os resultados das medições antes e depois da fase de ensaio são mostrados na Tabela 14.

Tabela 14 - Resultados das medições das ferramentas antes e depois dos ensaios

RESULTADOS DAS MEDIÇÕES - Antes e Depois dos Ensaios						
CARACTERÍSTICAS	ANTES		DEPOIS		DELTA	
	FERRAMENTA		FERRAMENTA		FERRAMENTA	
	I	II	I	II	I	II
CARACTER1 (superfície)	-0,032	-0,050	-0,032	-0,049	0,00	0,00
CARACTER2 (superfície)	0,085	-0,290	0,087	-0,305	0,00	-0,02
CARACTER3 (superfície)	0,050	-0,120	0,050	-0,126	0,00	0,01
CARACTER4 (furo)	0,070	0,270	0,069	0,439	0,00	0,17
CARACTER5 (furo)	0,170	0,810	0,181	0,853	0,01	0,04

Fonte: Autor.

Todos os resultados foram mensurados na unidade de milímetros (mm) e refletem a conformidade das ferramentas de prova para as cinco características definidas para análise neste estudo. Os valores da tabela refletem para cada superfície o maior desvio normal apresentado entre todos os pontos medidos para cada característica. Para os furos os valores da tabela são os respectivos desvios de ambas posições em relação ao valor nominal definido em projeto.

Levando em consideração para ambas as ferramentas de prova que os valores da primeira medição representam as variações do processo de fabricação, pode-se afirmar que as diferenças entre os resultados de ambas medições para as cinco características representam as respectivas deformidades em decorrência dos esforços exercido pela prensa após os 958 ciclos executados na fase de ensaio.

Os resultados das medições foram padronizados com três casas decimais após a vírgula e a diferença (delta) padronizado com duas casas decimais.

4.5. Porosidade – FERRAMENTA I e FERRAMENTA II

Conforme descrito no item 3.2.5 sobre a metodologia para cálculo da porosidade, neste item será mostrado os resultados desta avaliação. Nas Figuras 31 e 33 são mostradas as propriedades físicas e mecânicas inseridas no software Fusion 360 para ambos os materiais, já nas Figuras 32 e 34 pode-se ver os valores das massas teóricas (mt) calculadas para a FERRAMENTA I e FERRAMENTA II. As massas reais (mr) mensuradas a partir do processo de pesagem são mostradas nas Figuras 35 e 36. Todas as informações citadas anteriormente fazem necessárias para calcular os valores da porosidade.

Figura 31 - Propriedades físicas e mecânicas do AA 7050-T7 451 inseridas no Fusion 360

Material Editor

Identity Appearance **Physical** +

Basic Properties ☐ Advanced Properties

Name Aluminum 7050-T7 451

Description Aluminum zinc alloy, annealed

Keywords Annealed,structural,metal

Type Metal

Subclass Aluminum

Source Autodesk

Source URL

▼ Basic Thermal

Thermal Conductivity 1,570E+02 W/(m·K)

Specific Heat 0,960 J/(g·°C)

Thermal Expansion Coefficient 21,100 µm/(m·°C)

▼ Mechanical

Young's Modulus 72,000 GPa

Poisson's Ratio 0,33

Shear Modulus 26900,000 MPa

Density 2,830 g/cm³

Damping Coefficient 0,00

▼ Strength

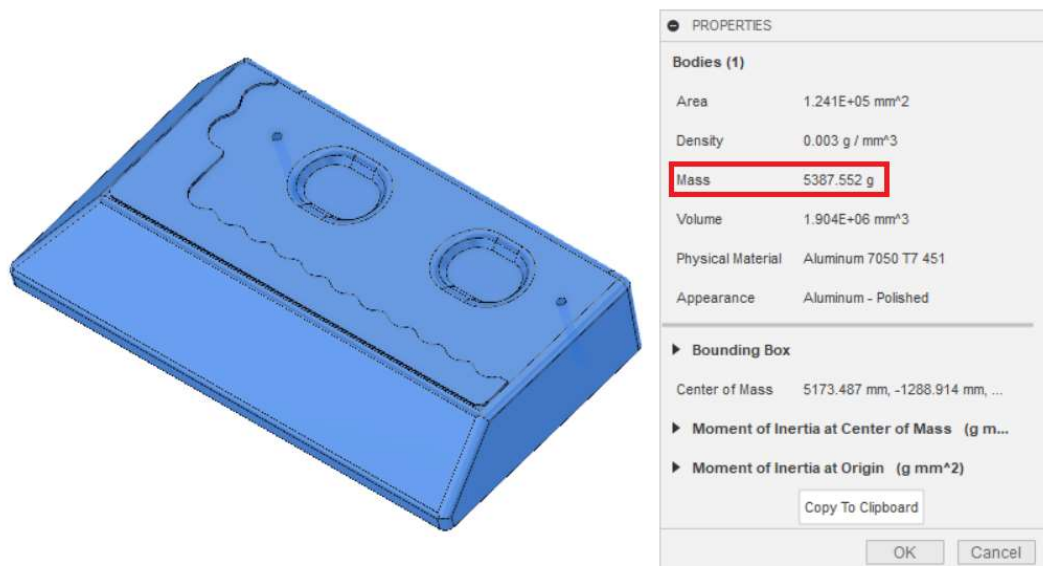
Yield Strength 470,000 MPa

Tensile Strength 525,000 MPa

☒ Thermally Treated

Fonte: Autor.

Figura 32 - Cálculo da massa teórica (mt) da FERRAMENTA I



Fonte: Autor.

Figura 33 - Propriedades físicas e mecânicas do ULTEM 9085 inseridas no Fusion 360

Material Editor

Identity Appearance **Physical**

Basic Properties ☐ Advanced Properties

▼ Information

Name: ULTEM 9085

Description: Polyetherimide

Keywords: structural, Plastic

Type: Plastic

Subclass: Thermoplastic

Source: Autodesk

Source URL:

▼ Basic Thermal

Thermal Conductivity: 6,970E-02 W/(m·K)

Specific Heat: 1,534 J/(g·°C)

Thermal Expansion Coefficient: 65,270 µm/(m·°C)

▼ Mechanical

Young's Modulus: 2,330 GPa

Poisson's Ratio: 0,28

Shear Modulus: 903,000 MPa

Density: 1,270 g/cm³

Damping Coefficient: 0,00

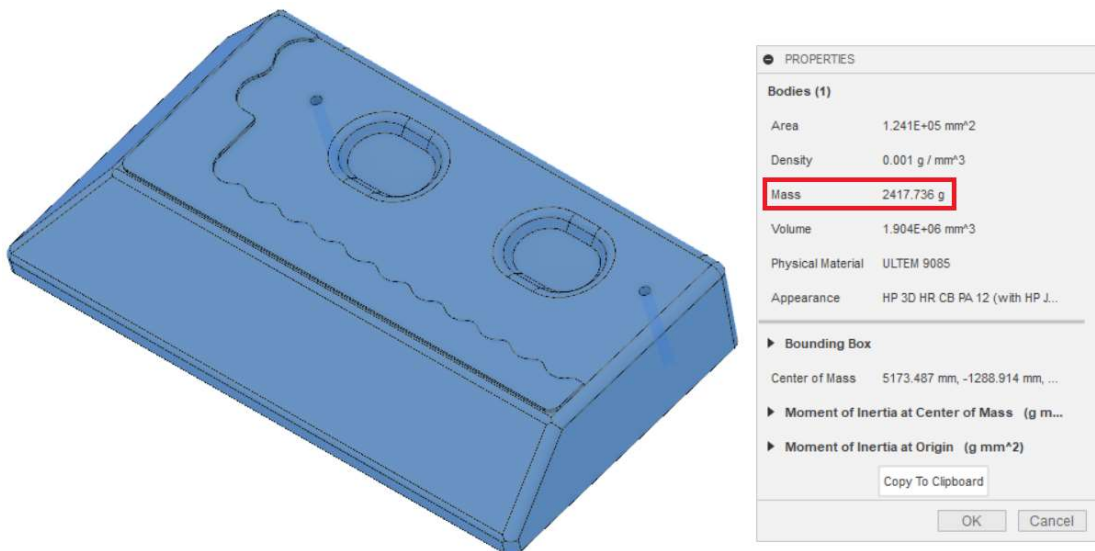
▼ Strength

Yield Strength: 38,000 MPa

Tensile Strength: 67,000 MPa

Fonte: Autor.

Figura 34 - Cálculo da massa teórica (mt) da FERRAMENTA II



Fonte: Autor.

A pesagem para obter a massa real (m_r) foram repetidas cinco vezes para ambas as ferramentas de prova e a partir dos valores foi calculado a média. Nas figuras 35 e 36 é mostrado o processo de pesagem.

Figura 35 - Massa real (m_r) para a FERRAMENTA I



Fonte: Autor.

Figura 36 - Massa real (m_r) para a FERRAMENTA II



Fonte: Autor.

Na Tabela 15 é mostrado os valores das cinco medições de massa e os respectivos valores médios para a FERRAMENTA I e FERRAMENTA II.

Tabela 15 - Massas reais para ambas as ferramentas de prova

Massa real (mr) [g]		
Medições	FERRAMENTA	
	I	II
1a	5368	2248
2a	5368	2248
3a	5368	2248
4a	5366	2248
5a	5368	2248
Média (M)	5367,6	2248

Fonte: Autor.

Com todos os valores de massas teóricas e reais definidas é possível calcular a porosidade para a FERRAMENTA I e FERRAMENTA II conforme metodologia proposta. A Tabela 16 mostra os resultados e a forma dos cálculos.

Tabela 16 - Cálculo e resultados das porosidades para ambas ferramentas de prova

Porosidade [%]		
	FERRAMENTA	
	I	II
Massa teórica (mt) [g]	5387,55	2417,74
Média massa real (Mmr) [g]	5367,60	2248,00
Diferença (mt - Mmr) [g]	19,95	169,74
Porosidade $((mt - Mmr) / mt) [%]$	0,37	7,02

Fonte: Autor.

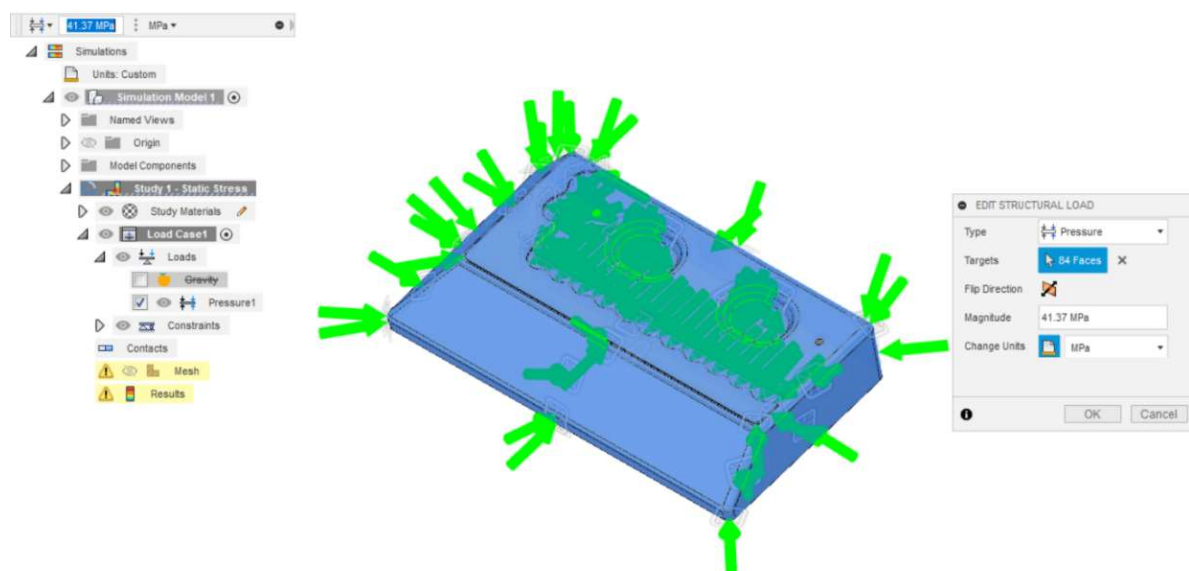
4.6. Simulação Estática (MEF) - FERRAMENTA I e FERRAMENTA II

A simulação numérica por elementos finitos realizada neste estudo trouxe de forma virtual o comportamento das ferramentas de prova na condição dos ensaios. Desta forma, na sequência são apresentadas as premissas definidas dentro do ambiente de simulação do software utilizado.

Os parâmetros mecânicos mostrados nas Tabelas 5 e 6 foram inseridos nas configurações de materiais dentro do software Fusion 360 conforme apresentado nas Figuras 31 e 33.

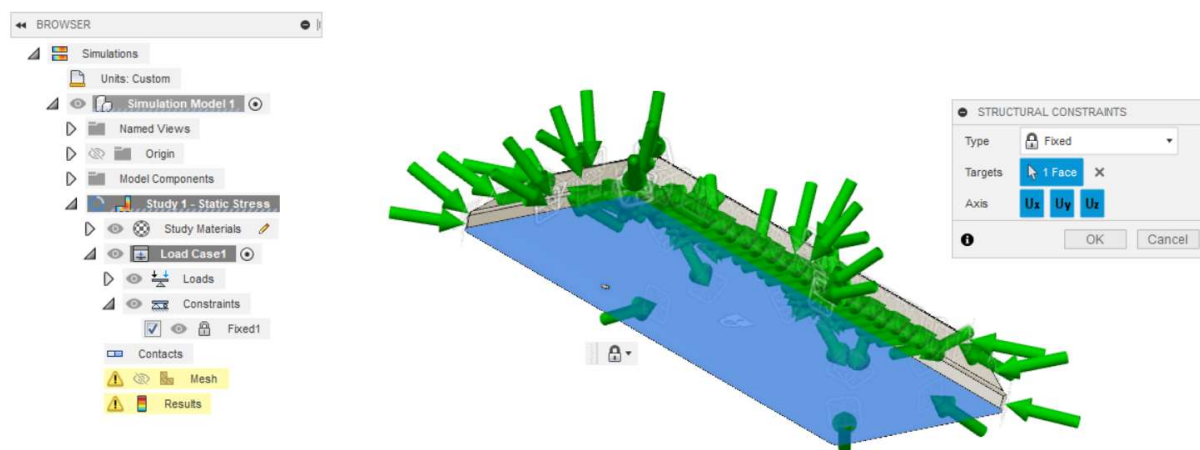
As condições de carregamento e restrição para ambas as simulações foram as mesmas. O carregamento foi definido a partir do valor máximo de pressão (41,37 MPa) utilizado no ensaio e foi aplicado uniformemente sobre toda superfície do modelo 3D, exceto no plano inferior do modelo definido como a restrição de deslocamento e que representa a condição dos ensaios, referenciando o posicionamento das ferramentas de prova na gaveta da prensa. Nota-se que as tensões geradas são de compressão. Nas Figuras 37 e 38 é possível ver respectivamente o carregamento virtual e a condição de restrição definidas para as simulações estática.

Figura 37 - Carregamento virtual definido para ambas análises estáticas



Fonte: Autor.

Figura 38 - Condição de restrição definida para ambas análises estáticas



Fonte: Autor.

Os elementos definidos para a malha foram do tipo parabólico e com tamanho padronizado em 5 mm. Na Figura 39 pode ser vista a malha gerada a partir do modelo 3D para ambas as simulações.

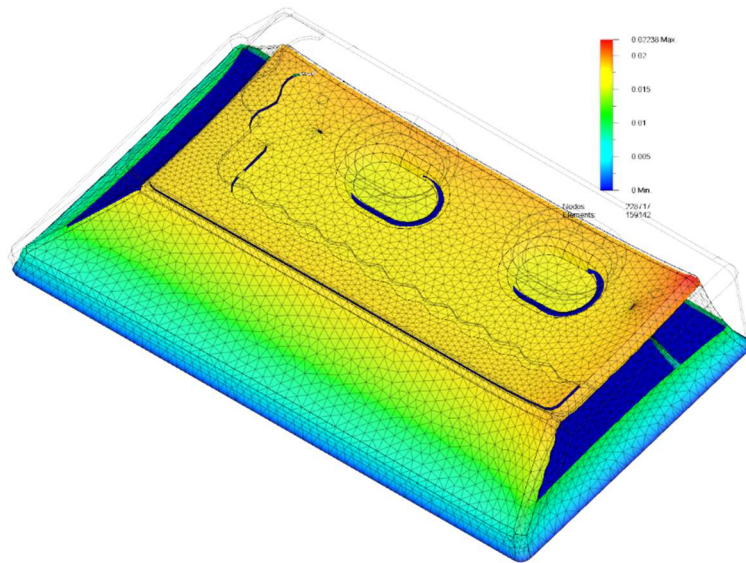
Figura 39 - Malha definida para as simulações estáticas



Fonte: Autor.

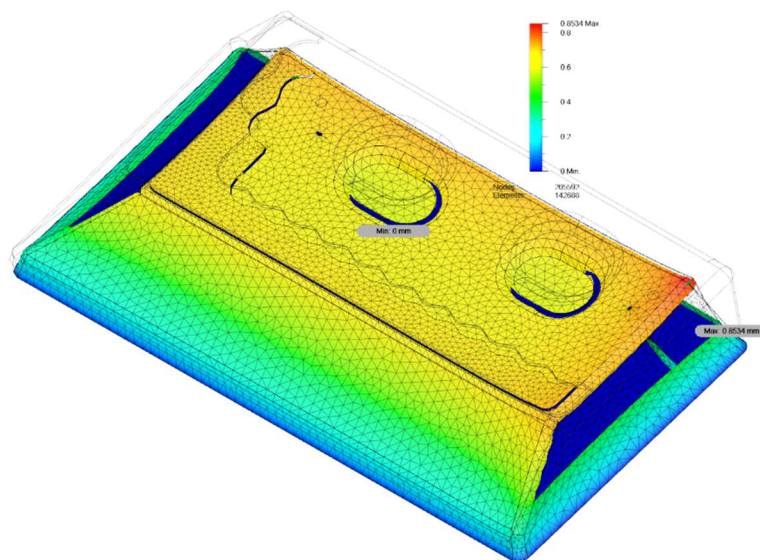
Após inserido e configurado todos os parâmetros para ambas as simulações, as mesmas foram resolvidas. Os resultados apresentados são os deslocamentos (deformações) das ferramentas. As Figuras 40 e 41 apresentam estas deformações, respectivamente, para a FERRAMENTA I e FERRAMENTA II.

Figura 40 - Deformação: Simulação estática para a FERRAMENTA I



Fonte: Autor.

Figura 41 - Deformação: Simulação estática para a FERRAMENTA II



Fonte: Autor.

5. DISCUSSÕES

O foco principal para análise da estabilidade dimensional é a FERRAMENTA II, manufaturada aditivamente, porém de forma breve será discutido sobre a FERRAMENTA I, que se assim feito ajudará para discussões comparativa entre ambas as ferramentas de prova. Em segundo momento será discutido sobre os resultados de ambas as análises por elementos finitos como ferramenta de previsibilidade das deformações apresentadas na fase experimental (medições e ensaios) e também sobre os valores das porosidades calculadas e o que elas interferem nos resultados.

Os resultados de deformação apresentados na fase experimental do estudo para a FERRAMENTA I teve como maior valor 0,01 mm e ocorreu na CHARACTER5 (furo). Considerando que este tipo de característica em ferramentas de conformação pode variar 0,3 mm, é possível afirmar que o desvio apresentado representa aproximadamente 3,33% da tolerância, sendo totalmente aceitável a variação apresentada. Ainda para a FERRAMENTA I, ao analisar os resultados das deformações apresentadas no método por elementos finitos observa-se no mapa de cor que a maior deformação atinge o valor próximo de 0,0224 mm. A região do desvio em questão não foi medida na fase experimental, mas está entre três regiões medidas, que são as CHARACTER2, CHARACTER3 e CHARACTER4.

Na Tabela 17 é apresentado os resultados das deformações da fase experimental e da fase de simulação. Para cada característica medida na fase experimental foi associado o maior e respectivo desvio para a mesma região do mapa de cor. Ao avaliar os valores apresentados na Tabela 17 nota-se que as deformações da fase experimental e fase simulada apresentam comportamentos constantes, ou seja, mesma deformação para todas características. A diferença entre as deformações da fase experimental e simulada para cada característica é muito baixa, apresentando valores na ordem de centésimos de milímetros (0,02 mm). Com os valores apresentados na Tabela 17 entende-se que a análise por elementos finitos para a FERRAMENTA I apresentou resultados muito próximos dos valores de deformações apresentados nos ensaios.

Tabela 17 - Valores das deformações para a FERRAMENTA I: Experimental e Simulação

DEFORMAÇÕES [mm]		
CARACTERÍSTICAS	FERRAMENTA I	
	DELTA MEDIÇÃO	MEF (maior desvio por característica medida)
CARACTER1 (superfície)	0,00	0,02
CARACTER2 (superfície)	0,00	0,02
CARACTER3 (superfície)	0,00	0,02
CARACTER4 (posição de furo)	0,00	0,02
CARACTER5 (posição de furo)	0,01	0,02

Fonte: Autor.

As deformações apresentadas para a FERRAMENTA I na fase experimental endossam a porosidade calculada para a respectiva ferramenta de prova, o valor apresentado é menor que 0,5%, confirmando a característica maciça da matéria-prima utilizada e não influenciando nos resultados de deformações apresentados. O valor de porosidade calculado é pequeno e pode ser oriundo das variações na densidade da matéria prima utilizada em relação ao valor da densidade utilizada, conforme informado na Tabela 5.

Os resultados de deformação apresentados na fase experimental do estudo para a FERRAMENTA II tiveram como maior desvio o valor de 0,17 mm e ocorreu na CARACTER4, também um furo. Da mesma forma que para a FERRAMENTA I, ao considerar que este tipo de característica em ferramentas de conformação pode ter desvio de até 0,3 mm em relação ao projeto, é possível afirmar que o desvio apresentado está dentro do aceitável, representando aproximadamente 57% da tolerância.

Ao analisar os valores das deformações apresentadas no método por elementos finitos para a FERRAMENTA II, observa-se no mapa de cor que a maior deformação atinge o valor próximo de 0,85 mm. A região que apresentou este maior desvio não foi medida na fase experimental, mas está muito próxima de três regiões medidas, que são as CARACTER2, CARACTER3 e CARACTER4. As regiões de maior deformação apresentadas em ambas simulações são as mesmas tanto para a FERRAMENTA I quanto para a FERRAMENTA II.

Na Tabela 18 é apresentado os resultados das deformações da fase experimental e da fase de simulação. Para cada característica medida na fase experimental foi associado o maior e respectivo desvio para a mesma região do mapa de cor.

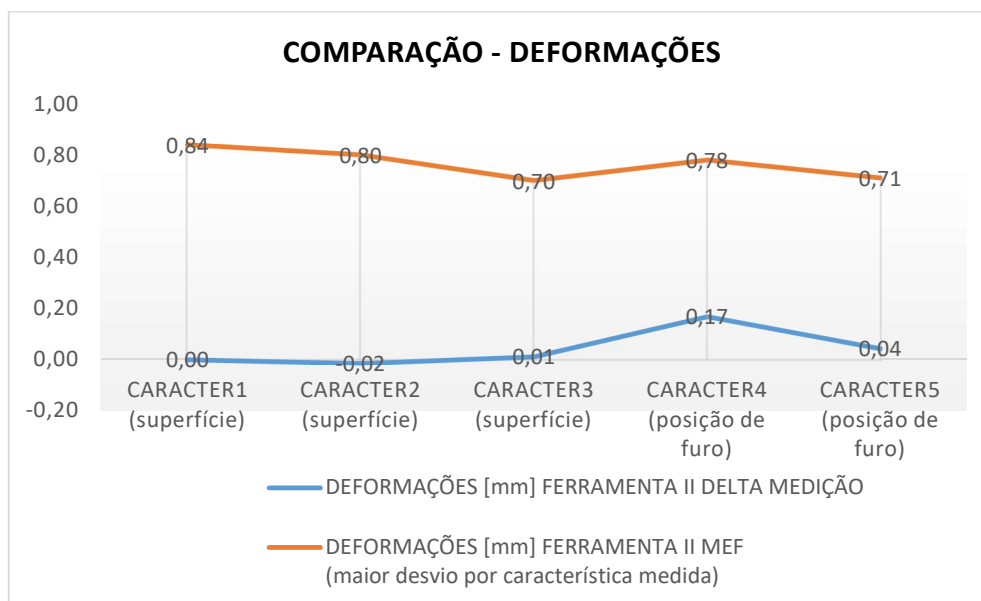
Tabela 18 - Valores das deformações para a FERRAMENTA II: Experimental e Simulação

DEFORMAÇÕES [mm]		
CARACTERÍSTICAS	FERRAMENTA II	
	DELTA MEDIÇÃO	MEF (maior desvio por característica medida)
CARACTER1 (superfície)	0,00	0,84
CARACTER2 (superfície)	-0,02	0,80
CARACTER3 (superfície)	0,01	0,70
CARACTER4 (posição de furo)	0,17	0,78
CARACTER5 (posição de furo)	0,04	0,71

Fonte: Autor.

Ao plotar os valores da Tabela 18 em gráfico, nota-se na Figura 42 que o comportamento global das deformações para cada tipo de avaliação é qualitativamente similar, ou seja, por mais que os resultados de deformação da fase experimental são diferentes dos resultados da simulação, os comportamentos de ambos apresentam similaridades.

Figura 42 - Comparação de deformações para a FERRAMENTA II: Experimental e Simulação



Fonte: Autor.

O método de elementos finitos realizado para FERRAMENTA II considerou o modelo 3D utilizado como isotrópico e os parâmetros mecânicos da orientação de deposição XY do material ULTEM 9085, logo os resultados esperados para as deformações eram menores que os calculados pelo MEF. Nota-se uma grande discrepância nos valores das deformações se comparado os resultados experimentais e simulados. Esta avaliação ainda traz incertezas no uso

de MEF para objetos manufaturados aditivamente, conforme já explorado por outros autores [80; 82]. Isso se deve principalmente à três fatores: diferença de porosidade entre a condição modelada e experimental, limitações dos softwares para representar a condição anisotrópica em um corpo rígido e atribuir os respectivos parâmetros mecânicos dos materiais utilizado em processos aditivos e a falta de informação por parte dos fornecedores para com as propriedades anisotrópicas e ortotrópicas dos materiais utilizados em MA.

Os valores das deformações apresentadas na fase de simulação em relação aos resultados da fase experimental para a FERRAMENTA II variaram acima de 1000%, afirmando que os parâmetros mecânicos e a metodologia utilizada para a simulação não representam o comportamento real do material ULTEM 9085.

Ao comparar os resultados das deformações para a FERRAMENTA I e FERRAMENTA II na fase experimental, observa-se que os valores são muito baixos tendendo a não ter deformação, exceto para a CHARACTER4 da FERRAMENTA II. A característica em questão sempre apresentou valores mais altos desde a sua fabricação, conforme pode ser visto na Tabela 14. A deformação de 0,17 mm se comparada com as deformações das demais características torna um ponto fora da curva, mas ainda é uma variação pequena e aceitável se considerado que a deformação é em decorrência de 958 prensagens com carga próxima de 41 MPa. De forma geral os resultados de deformação apresentados para a FERRAMENTA II são muito satisfatórios.

Os valores das deformações na fase experimental para a FERRAMENTA I e FERRAMENTA II são apresentadas na Tabela 19 para fins de comparação.

Tabela 19 - Valores das deformações na fase experimental: FERRAMENTA I e FERRAMENTA II

DEFORMAÇÕES [mm]		
CARACTERÍSTICAS	DELTA MEDIÇÃO	
	FERRAMENTA I	FERRAMENTA II
CARACTER1 (superfície)	0,00	0,00
CARACTER2 (superfície)	0,00	-0,02
CARACTER3 (superfície)	0,00	0,01
CARACTER4 (posição de furo)	0,00	0,17
CARACTER5 (posição de furo)	0,01	0,04

Fonte: Autor.

Apesar da FERRAMENTA II ter sido manufaturada com preenchimento de 100%, ainda há possibilidades de existir porosidade no objeto impresso, logo a discrepância na deformação de 0,17 mm, se comparada com os demais valores apresentados, pode estar

associada a isto. De acordo com o cálculo de porosidade definido neste estudo, pode ser considerado que a FERRAMENTA II possui uma porosidade em torno de 7%. Somada a porosidade, a quantidade de ciclos pode ter influenciado na deformação de 0,17 mm mensurado nas medições para a FERRAMENTA II, interferindo no regime plástico do material. No estudo não foi possível encontrar uma relação da quantidade de ciclos X deformação.

Ainda para a FERRAMENTA II, é possível afirmar que as características de furos (CARCATER 4 e CHARACTER 5) foram as que tiveram maiores deformações.

Os resultados apresentados na fase experimental foram pertinentes, fundamentais e de suma importância para as discussões, validação e conclusão do trabalho. O uso do método por elementos finitos (MEF) foi proposto em carácter secundário dentro do estudo. Os resultados apresentados com uso do MEF somaram para as discussões e trouxeram oportunidades futuras no que tange o refinamento e uso da ferramenta para avaliação mecânica em corpos rígidos manufaturados aditivamente.

6. CONCLUSÃO

Sabendo que peças e objetos impressos em 3D com a tecnologia por extrusão de material apresentam uma grande inconsistência em suas características mecânicas, e considerando o objetivo deste trabalho em avaliar a estabilidade dimensional de ferramentas de conformação manufaturadas aditivamente, a partir dos resultados experimentais e simulados conclui-se que:

1. As deformações apresentadas na fase experimental e de simulação para a FERRAMENTA I afirmam que o processo convencional de fabricação somado à liga de alumínio utilizada entregam uma ferramenta superdimensionada, com deformações tendendo a zero mesmo após quase 1000 ciclos com carga de 41 MPa. Isto mostra que mais desenvolvimentos como este devem ser realizados com o objetivo de dimensionar uma ferramenta com vida útil finita e com menores custos. Para isto a MA e MEF podem ser boas alternativas.
2. Os resultados obtidos na fase experimentas deste estudo para a FERRAMENTA II, fabricada com material ULTEM 9085 e preenchimento de 100%, submetida 958 vezes às cargas de 41 MPa mostraram resultados muito satisfatórios de deformação, podendo afirmar que a estabilidade dimensional foi garantida para a proposta do trabalho.
3. A tecnologia por extrusão de material, mesmo com preenchimento total definido para o processo de fabricação não garante baixos valores (menor que 1%) de porosidade para o item final manufaturado, pois conforme apresentado na metodologia deste estudo a FERRAMENTA II foi manufaturada com 100% de preenchimento e a porosidade calculada para a mesma ferramenta foi em torno de 7%.
4. Considerando que as duas maiores deformações apresentadas para a FERRAMENTA II nos resultados experimentais estão associadas com as características de furos, fica claro que este tipo de geometria possui uma maior deformidade em objetos impressos quando submetida a cargas. Desta forma, aumentar o robustecimento destas características no processo de fabricação podem mitigar este tipo de ocorrência. Aumentar a espessura ou a quantidade de paredes para furos no processo de impressão torna-se uma boa alternativa para reforço da geometria.
5. A comparação dos resultados experimentais com os resultados simulados se mostrou bastante diferentes para a FERRAMENTA II. Isso era esperado, mas não nos níveis

apresentados, chegando a variações acima de 1000%. Os resultados de deformação apresentados na simulação podem ser utilizados de forma orientativa, mas não com carácter assertivo para avaliar o desempenho mecânico e tomada de decisão sobre um objeto manufaturado aditivamente e com esforços submetidos.

6. O uso da MA para fabricar ferramentas, dispositivos, moldes e outros itens similares traz reduções de massa para os itens fabricados em até 60%, trazendo ganhos de manuseio, armazenamento e de segurança dentro de um processo produtivo.

6.1. Trabalhos futuros

A partir das discussões e conclusão, seguem sugestões para trabalhos futuros:

1. Melhores metodologias devem ser definidas para uso de MEF em peças impressas em 3D, além da busca por softwares que simulem a característica anisotrópica dos materiais utilizados na MA.
2. Elaborar outros estudos/ experimentos levando em consideração a vida útil das ferramentas manufaturadas aditivamente.
3. Desenvolver um método confiável para mensurar porosidade das ferramentas e também de qualquer tipo de peças fabricadas por MA.

REFERÊNCIAS

1. Diño, M. J. S.; Ong, I., **Research, Technology, Education & Scholarship in the Fourth Industrial Revolution [4IR]: Influences in Nursing and the Health Sciences**; The Journal of Medical Investigation 66, 2019, pp. 3-7.
2. Patel, S.; Patel, A., **A Big Data Revolution in Health Care Sector Opportunities, Challenges and Technological Advancements**; International Journal of Information Sciences and Techniques (IJIST) 6, No.1/2, 2016, pp. 155-162.
3. Potocan, V.; Mulej, M.; Nedelko, Z., **Society 5.0 balancing of Industry 4.0, economic advancement and social problem**; Kybernetes 50, No. 3, 2021, pp. 795-811.
4. Durgun, I., **Sheet metal forming using FDM rapid prototype tool**; Rapid Prototyping Journal 21/4, 2015, pp. 412–422.
5. Dalenogare, L. S. et al., **The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance**; International Journal of Production Economics 204, 2018, pp. 383-394.
6. Ahrens, C. H.; Ferreira, C. V.; Petrush, Günther; de Carvalho, J.; dos Santos, J. R. L.; da Silva, J. V. L.; Volpato, N., **PROTOTIPAGEM RÁPIDA: Tecnologias e aplicações**; Editora Blucher, São Paulo, 1ª reimpressão – 2013, pp. 1-163.
7. Jaya Christiyan, K.G. et al., **A study on the influence of process parameters on the Mechanical Properties of 3D printed ABS composite**; IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 114, 2016, pp. 1-8.
8. Minev, R.; Minev, E., **Technologies for Rapid Prototyping (RP) - Basic Concepts, Quality Issues and Modern Trends**; Scripta Scientifica Medicinae Dentalis 2, No 1, 2016, pp. 12-22.
9. Dimitrov, D.M.; de Beer, N., **Improvements in the capability profile of 3-d printing: an update**; South African Journal of Industrial Engineering 25, No.2, 2014, pp. 1-12.
10. Xu, L. D. et al., **Industry 4 0 state of the art and future trends**; International Journal of Production Research 56, No. 8, 2018, pp. 2941-2962.
11. Ramalheira, J. M. L., **Comportamento Mecânico de Peças Hidroformadas**; Relatório do Projeto Final/ Dissertação do MIEM, Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, 2008.

12. Li, H. W. et al., **Forming mechanism and characteristics of a process for equal-thickness in-plane ring roll-bending of a metal strip by twin conical rolls**; J Mater Process Technol 227, 2016, pp. 288-307.
13. Guk, S. V.; Smirnov, O. M.; Kavalla, R., **Stampability of steel sheet and strip in axisymmetric hydraulic forming with fluid counterpressure**; Metallurg 3, 2006, pp. 34–37.
14. Alves, J. A. C.; Button, S. T., **Estudo da conformabilidade de abas convexas da liga de alumínio aa-2024-o no processo de hidroconformação**; 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2011.
15. Bortolussi, R.; Batalha, G. F.; Ponce, A. S., **Hidroconformação de Tubos: Influência dos Parâmetros no Processo**/ último acesso 30/05/2020:
http://www.poli.usp.br/pmr/lefa/download/COF_031010141.pdf.
16. Lang, L. H.; Wang, Z. R.; Kang, D. C.; Yuan, S. J.; Zhang, S. H.; Danckert, J.; Nielsen, K.B., **Hydroforming highlights: sheet hydroforming and tube hydroforming**; Journal of Materials Processing Technology 151, 2004, pp. 165–177.
17. Marciniak, Z. et al., **Hydroforming**; Mechanics of Sheet Metal Forming (Segunda Edição); 2002, pp. 152–163.
18. Zhang, S. H.; Wang, Z. R.; Xu, Y.; Wang, Z. T.; Zhou L. X., **Recent developments in sheet hydroforming Technology**; Journal of Materials Processing Technology 151, 2004, pp. 237-241.
19. Abrantes, J. P.; de Lima, C. E. C., **Simulação numérica da expansão hidrostática de tubos de alumínio**/ último acesso 30/05/2020:
http://sites.poli.usp.br/pmr/lefa/download/COF_031024538.pdf.
20. Lei, L.P.; Kang, B.S.; Kang, S.J., **Prediction of the forming limit in hydroforming processes using the finite element method and a ductile fracture criterion**; Journal of Materials Processing Technology 113, 2001, pp. 673-679.
21. Hiemenz, J., **Additive Manufacturing Trends In Aerospace – Leading the way**, Stratasys, Inc, 2014.
22. Durgun, I., **Sheet metal forming using FDM rapid prototype tool**; Rapid Prototyping Journal 21, No. 4, 2015, pp. 412-422.
23. Yadav, A. D., **Process analysis and design in stamping and sheet hydroforming**; Doctorate Thesys, The Ohio State University, 223p.
24. **Hydroforming**/ último acesso 03/09/2020:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Hydroforming>

25. Singh, H., **Fundamentals of Hydroforming**; Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan, 2003
26. Rodrigues, J.; Martins, P., **Tecnologia Mecânica - Tecnologia da Deformação Plástica**; Vol. I, Fundamentos teóricos, Escolar Editora, 2005
27. Liu, J., et al., **Springback analysis of thin-walled stainless steel bellow in hydroforming**; Adv Mater Res 1095, 2015, pp. 855-858.
28. Kuo1, C-C.; Li, M-R., **Development of sheet metal forming dies with excellent mechanical properties using additive manufacturing and rapid tooling technologies**; International Journal of Advanced Manufacturing Technology 90, 2017, pp. 21-25
29. Pereira, F. L.; Cavasso, P. H. F, **Otimização do chassis do projeto de eficiência energética**; Monografia – Tecnologia em Mecânica Automobilística, 2015.
30. De Oliveira, R. R., **Avaliação da tensão residual em alumínio 7050 conformado pelo processo peen forming**; Dissertação de Mestrado, 2011
31. Rossino, L. S.; Ashiuchi, E.; Manfrinato, M. D; Araújo, J. A.; Bose Filho, W. W., **Resistência à Fadiga por Fretting Da Liga AA7050-T7451**; Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração 6, No. 3, 2010, pp. 167-173
32. Infoescola, **Alumínio**/ último acesso 15/03/2020:
<https://www.infoescola.com/elementos-quimicos/aluminio/>
33. Mertens, A. I., **Fusion-Based Additive Manufacturing for Processing Aluminum Alloys: State-of-the-Art and Challenges**; ADVANCED ENGINEERING MATERIALS 19, No. 8, 2017, pp. 1-13.
34. Buzinelli, D. V.; Malite, M., **Dimensionamento de Elementos Estruturais em Alumínio**; Eng. de Estruturas – USP, SÃO CARLOS/ disponível em:
http://web.set.eesc.usp.br/static/data/producao/2000ME_DidianeVictoriaBuzinelli.pdf.
35. EOS, **Metal Materials – Additive Manufacturing**/ último acesso 22/01/2021/
<https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-metal/dmls-metal-materials/aluminium-al>.
36. Stojanovic, B. et al., **Application of Aluminum and Aluminum Alloys in Engineering**; Engineering Letters: Journal of Engineering and Applied Sciences 3, No. 2, 2018, pp 52-62.
37. Patel, V. V., **Friction Stir Processing as a Novel Technique to Achieve Superplasticity in Aluminum Alloys: Process Variables, Variants, and Applications**; Metallogr. Microstruct. Anal. 5, 2016, pp. 278-293.

38. Onder, V. D., **Análise da Liga de Alumínio AA7050 na Condição de Tratamento Térmico de Envelhecimento Interrompido**; 2015.
39. Graf, A., **Aluminum alloys for lightweight automotive structures**; Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicle 2, 2021, pp. 97-123.
40. Kermanidis, A. T., **Aircraft Aluminum Alloys: Applications and Future Trends**; Revolutionizing Aircraft Materials and Processes, 2020, pp 21-55.
41. Shin, J. et al., **Castability and mechanical properties of new 7xxx aluminum alloys for automotive chassis/body applications**; Journal of Alloys and Compounds 698, 2017, pp. 577-590
42. Infomet, **Alumínio – Informações Técnicas – Liga Al-Zn**/ último acesso 12/12/2020/ <https://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=55>.
43. Bagsik, A.; Schöeppner, V.; Klemp, E., **FDM Part Quality Manufactured with Ultem*9085**. In Proceedings of the 14th International Scientific Conference on Polymeric Materials, Halle, Germany, 15–17 September 2010; N.M.Emanuel Institute of Biochemical Physics, Russian Academy of Sciences: Moscow, Russia, 2010.
44. Wu, H., **Multi-functional ULTEM™1010 composite filaments for additive manufacturing using Fused Filament Fabrication (FFF)**; Additive Manufacturing 24, 2018, pp. 298-30
45. Forés-Garriga, A. et al., **Role of infill parameters on the mechanical performance and weight reduction of PEI Ultem processed by FFF**; Materials and Design 193, 2020, pp. 1-12.
46. Chi, Q. et al., **Excellent energy storage performance of polyetherimide filled by oriented nanofibers with optimized diameters**; Materials Today Energy 18, 2020, pp. 1-11.
47. Products and markets guide: **Ultem and Siltem resins**; SABIC INNOVATIVE PLASTICS, 2008.
48. Tan, L. J.; Zhu, W.; Zhou, K., **Recent Progress on Polymer Materials for Additive Manufacturing**; Advanced Functional Materials 30, 2020, pp. 1-54.
49. Lv, Y. F. et al., **Flame retardant polymeric materials for additive manufacturing**; Materials Today: Proceedings 33, 2020, pp. 5720-5724.
50. Ding, S. et al., **Effects of nozzle temperature and building orientation on mechanical properties and microstructure of PEEK and PEI printed by 3D-FDM**; Polymer Testing 78, 2019, pp. 1-9.

51. Sônego, M., **Efeitos de degradação e de alterações microestruturais do polímero no desempenho mecânico estático de juntas híbridas de polieterimida (PEI) e alumínio produzidas por F-ICJ**; Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, 2016.
52. **Supplier Data - Polyetherimide (PEI) (Goodfellow)**, AZO Material/ último acesso 07/01/2022: <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1883>.
53. **Manufatura Aditiva**, Wishboxtechnologies,/ último acesso 12/05/2020: <http://blog.wishbox.net.br/2015/09/24/afinal-o-que-e-manufatura-aditiva/>.
54. **ASTM International and ISO Unveil Framework for Global 3D Printing Standards**/ último acesso 07/01/2022: <https://sn.astm.org/?q=outreach/astm-international-and-iso-unveil-framework-global-3d-printing-standards-nd16.html>.
55. Kamran, M.; Saxena, A., **A Comprehensive Study on 3D Printing Technology**; MIT International Journal of Mechanical Engineering 6, No. 2, 2016, pp. 63-69.
56. Rayna, T.; Striukova, L., **From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation**; Technological Forecasting & Social Change 102, 2016, pp. 214-224.
57. Bagsik, A.; Josupeit, S.; Schöeppner, V.; Klemp, E., **Mechanical Analysis of Lightweight Constructions Manufactured with Fused Deposition Modeling**; Proceedings of PPS-29 AIP Conf. Proc. 1593, 2014, pp. 696-701.
58. Mandić, V.; Ćosić P., **Integrated product and process development in collaborative virtual engineering environment**; Technical Gazette 18, 2011, pp. 369-378.
59. **Recent advances make 3d printing powerful competitor conventional mass production-3d**; Economist/ último acesso 15/09/2020: <https://www.economist.com/news/briefing/21724368-recent-advances-make-3d-printing-powerful-competitor-conventional-mass-production-3d>
60. Nycz, A. et al., **Challenges in Making Complex Metal Large-Scale Parts for Additive Manufacturing: A Case Study Based on the Additive Manufacturing Excavator**; Proceedings of the 28th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, 2017, pp. 2024-2033
61. **Órgãos impressos em 3D poderão ser usados por humanos em breve**; Exame, 2017/ último acesso 12/08/2019: <https://exame.abril.com.br/ciencia/orgaos-impressos-em-3d-poderao-ser-usados-por-humanos-em-breve/>
62. Gross, B.C., **Evaluation of 3D Printing and Its Potential Impact on Biotechnology and the Chemical Science**; Analytical Chemistry, 2014 86(7), pp. 3240-3253;

63. Giordano, G.; Lamontagne, N. D., **The Heart of 3D Printing; Plastics Engineering**, 2018, pp. 16-29.
64. Cruz, P.; Shoemake, E. D.; Adam, P.; Leachman, J., **Tensile strengths of polyamide based 3D printed polymers in liquid nitrogen**; IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 102, 2015, pp. 1-6.
65. ISO/ASTM52900 - **15 Standard Terminology for Additive Manufacturing - General Principles — Terminology**.
66. Chua, C. K.; Leong, K. F., **3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications**, World Scientific 4th ed., 2014.
67. Huang, Y.; Leu, M. C.; Mazumder, J.; Donmez, A, **Additive Manufacturing: Current State, Future Potential, Gaps and Needs, and Recommendations**; Journal of Manufacturing Science and Engineering 137, No. 1, 2015.
68. Xu, F.; Wong, Y. S.; Loh, H. T, **Toward generic models for comparative evaluation and process selection in rapid prototyping and manufacturing**; Journal of Manufacturing Systems 19(5), 2001, pp. 283-296.
69. **A cooperação reforça a experiência em manufatura aditiva**; Realizer GmbH; Journal DMG MORI, nº 1, 2017, pp. 25.
70. Abreu, S. A. C., **Impressão 3D baixo custo versus impressão em equipamentos de elevado custo**; Dissertação de Mestrado, Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica - FEUP, 2015.
71. Singh, S.; Ramakrishna, S.; Singh, R., **Material issues in additive manufacturing: A review**; Journal Manufacturing Processes 25, 2017, pp. 185-200.
72. Byberg, K. I. et al., **Mechanical properties of ULTEM 9085 material processed by fused deposition modeling**; Polymer Testing 72, 2018, pp. 335-347.
73. Abreu, J. T. F., **Desenvolvimento de uma impressora FDM tipo delta**; Dissertação de Mestrado, Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica - FEUP, 2017.
74. ASTM, **Additive Manufacturing Technology Standards**/ último acesso 27/01/2021: <https://www.astm.org/Standards/additive-manufacturing-technology-standards.html>.
75. Stratasys, **FDM Tooling for Sheet Metal Forming: Hydroforming and Rubber Pad Press**; TECHNICAL APPLICATION GUIDE Doc. No. TAG 01-01, 2011, pp. 1-9.
76. Park, S. J., **High-temperature 3D printing of polyetheretherketone products: Perspective on industrial manufacturing applications of super engineering plastics**; Materials & Design 211, 2021, pp. 1-12.

77. Beal, V. E.; Ahrens, C. H.; Wendhausen, P. A., **The Use of Stereolithography Rapid Tools in the Manufacturing of Metal Powder Injection Molding Parts;** Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering XXVI, No. 1, 2004, pp. 40-46
78. Kuo1, C-C.; Lin, J-X., **A cost-effective method for rapid manufacturing polymer rapid tools used for liquid silicone rubber injection molding;** Int J Adv Manuf Technol 104, 2019, pp. 1159-1170.
79. Yasa, E. **Anisotropic impact toughness of chopped carbon fiber reinforced nylon fabricated by material-extrusion-based additive manufacturing;** Anadolu Univ. J. Sci. Technol. Appl. Sci. Eng. 20, 2019, pp. 195-203.
80. Abbot, D. W. et al., **Finite Element Analysis of 3D Printed Model via Compression Tests;** Procedia Manufacturing 35, 2019, pp. 164-173.
81. Calignano, F., **Investigation of the Mechanical Properties of a Carbon Fibre-Reinforced Nylon Filament for 3D Printing;** Machines 8, No. 5, 2020, pp. 1-13.
82. Cattenone, A. et al., **Finite Element Analysis of Additive Manufacturing Based on Fused Deposition Modeling: Distortions Prediction and Comparison with Experimental Data;** Journal of Manufacturing Science and Engineering 141, 2019, pp. 1-17.
83. Bhandari, S.; Lopez-Anido, R., **Finite element analysis of thermoplastic polymer extrusion 3D printed material for mechanical property prediction;** Additive Manufacturing 22, 2018, pp. 187-196
84. Ning, F.; Cong, W.; Hu, Y.; Wang, H., **Additive Manufacturing of Carbon Fiber-Reinforced Plastic Composites Using Fused Deposition Modeling: Effects of Process Parameters on Tensile Properties;** J. Compos. Mater. 51, No. 4, 2017, pp. 451-462.
85. Liao, G.; Li, Z.; Cheng, Y.; Xu, D.; Zhu, D.; Jiang, S.; Guo, J.; Chen, X.; Xu, G.; Zhu, Y., **Properties of Oriented Carbon Fiber/Polyamide 12 Composite Parts Fabricated by Fused Deposition Modeling;** Mater. Des. 139, 2018, pp. 283-292.
86. Ryder, M.; Lados, D.; Iannacchione, G.; Peterson, A., **Fabrication and Properties of Novel Polymer-Metal Composites Using Fused Deposition Modeling;** Compos. Sci. Technol. 158, 2018, pp. 43-50.

87. Alaimo, G.; Marconi, S.; Costato, L.; Auricchio, F., **Influence of Meso-Structure and Chemical Composition on FDM 3D-Printed Parts**; Compos. Part B: Eng. 113, 2017, pp. 371-380.
88. Jakus, A. E. et. Al., **3D-printing porosity: A new approach to creating elevated porosity materials and structures**; Acta Biomaterialia 72, 2018, pp. 94-109.
89. Wang, X. et al., **Effect of Porosity on Mechanical Properties of 3D Printed Polymers: Experiments and Micromechanical Modeling Based on X-ray Computed Tomography Analysis**; Polymers 11, No. 1154, 2019, pp. 1-20.
90. Lee, H. et al., **Evaluation of the Mechanical Properties of Porous Thermoplastic Polyurethane Obtained by 3D Printing for Protective Gear**; Advances in Materials Science and Engineering, 2019, pp. 1-10.
91. Buj-Corral, I., **Influence of infill and nozzle diameter on porosity of FDM printed parts with rectilinear grid pattern**; Procedia Manufacturing 41, 2019, pp. 288-295.
92. Buj-Corral, I., **Effect of Printing Parameters on Dimensional Error, Surface Roughness and Porosity of FFF Printed Parts with Grid Structure**; Polymers 13, 2021, pp. 1-13.
93. Santana, M. V. B.; Silveira, R. A. M., Silva, A. R. D., **Avaliação de Sistemas Estruturais Reticulados Planos: Modelagem, Análise Estática e Visualização da Resposta Usando o Mathematica**; XXXIV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, 2013, pp. 1-4.
94. Hayasaki, C. L.; Sousa, E. A. C., **Modelagem de estruturas ósseas e próteses através do método dos elementos finitos**; XIII SIMPEP, 2006, 12 pp.
95. Shelare, S. D. et al., **Computer aided modeling and finite element analysis of 3-D printed drone**; Materials Today: Proceedings 47, 2021, pp. 3375-3379.
96. Elsheikhi, S. A.; Benyounis, K. Y., **Review of recent developments in injection molding process for polymeric materials**; Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, 2016, pp. 1-18.
97. de Oliveira, A. L., **Proposta de um Método para Especificação de Tolerâncias Dimensionais de Produção de Peças Plásticas Injetadas**; Dissertação de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.
98. Hatch, J.E., **Aluminum: Properties and Physical Metallurgy**, ASM, Metals Park, USA, 1990.

99. ETTORE, B. Filho. **Seleção de metais não ferrosos**. 2 ed. São Paulo: Editora da UNICAMP, 1997.
100. Hernández, K. V. F., **Fadiga e Comportamento Tensão-Deformação Cíclico da Liga de Alumínio 7050-T7451**; Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 2016.
101. **ASM Metals Handbook. Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials** Vol. 10, No. 2. ASM Handbook Committee, 2010
102. Kaplun, B. W. et al., **Influence of orientation on mechanical properties for high-performance fused filament fabricated ultem 9085 and electro-statically dissipative polyetherketoneketone**; Additive Manufacturing 36, 2020, pp. 1-7.
103. **ULTEM 9085 Specification & Features**/ último acesso 02/02/2022: <https://www.javelin-tech.com/3d/stratasys-materials/ultem-9085/>.
104. **Ultem 9085, Techical Specifications**/ último acesso 02/02/2022: <https://www.materialise.com/en/manufacturing/materials/ultem-9085>.
105. **ULTEM 9085 Resin Data Sheet**, Stratasys; pp 1-19/ disponível em: <https://info.stratasysdirect.com/rs/626-SBR-192/images/Data%20Sheet%20-%20ULTEM%209085%20EN.pdf>.
106. **Best Practice: TIP SELECTION**, Stratasys/ disponível em: https://www.advancedtek.com/wp-content/uploads/2016/08/Best_Practice_-_Tip_Selection_-_04-14.pdf.