UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - EESC

JOÃO FIORE PARREIRA LOVO

**Projeto e fabricação de componentes mecânicos por manufatura aditiva e estruturação
interna**

São Carlos

2017

JOÃO FIORE PARREIRA LOVO

Projeto e fabricação de componentes mecânicos por manufatura aditiva e estruturação interna

Versão corrigida

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.
Área de Concentração: Projeto Mecânico.
Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Fortulan.

ESTE EXEMPLAR TRATA-SE DA
VERSÃO CORRIGIDA.

A VERSÃO ORIGINAL ENCONTRA-SE
DISPONÍVEL JUNTO AO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECANICA DA EESC-USP

São Carlos

2017

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

L896p Lovo, João Fiore Parreira
Projeto e fabricação de componentes mecânicos por manufatura aditiva e estruturação interna / João Fiore Parreira Lovo; orientador Carlos Alberto Fortulan. São Carlos, 2017.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Projeto Mecânico -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2017.

1. Projeto mecânico. 2. Estruturas mecânicas. 3. Manufatura aditiva. 4. Materiais compósitos.. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **JOÃO FIORE PARREIRA LOVO.**

Título da dissertação: "Projeto e fabricação de componentes mecânicos por manufatura aditiva e estruturação interna".

Data da defesa: 12/12/2017.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Carlos Alberto Fortulan**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Cesar Renato Foschini**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP - Bauru)

APROVADO

Prof. Dr. **Luís Antônio Oliveira Araújo**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:
Prof. Associado **Gherhardt Ribatski**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

A imaginação é mais importante que o conhecimento. O conhecimento é limitado. A imaginação circunda o mundo.

Albert Einstein

RESUMO

LOVO, J. F. P, **Projeto e fabricação de componentes mecânicos por manufatura aditiva e estruturação interna** – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

Na atividade de projeto mecânico é recorrente a busca por componentes resistentes, leves e de rápida fabricação. Materiais compósitos e estruturas modernas com alívio de massa vêm sendo cada vez mais empregados em diversos produtos, e ainda, o advento da manufatura aditiva viabiliza geometrias complexas e possibilita novas composições estruturais. Nesse sentido, o presente trabalho objetiva projetar e analisar a viabilidade de peças com estruturação interna se valendo de geometrias internas complexas (vazios) geradas por manufatura aditiva e da resistência mecânica de materiais de reforço (preenchendo tais vazios). Para tanto foi realizado projeto, fabricação e testes (físicos e virtuais) de corpos de prova densos e corpos de prova com canais estruturais internos preenchidos por material de reforço, sendo tais peças confeccionadas por manufatura aditiva e as estruturações internas otimizadas para suportar maiores tensões nas direções críticas do ensaio. Inicialmente foi caracterizado o material polimérico ABS impresso em diferentes orientações de fabricação. Também foi selecionado uma resina epoxi de alta resistência mecânica e fibra de carbono para uso como materiais de reforço. Diversas configurações e proporções com as matérias-primas empregadas nesse estudo foram caracterizadas mecanicamente para referenciamento do projeto. Dos resultados principais obtidos, os corpos de prova impressos em alta densidade e preenchidos, 5% em volume, apenas com resina, atingiram resistência à flexão de 57 MPa, 8% maior que os corpos feitos somente em ABS impresso. Após etapas de otimização da geometria interna, com uso do Método dos Elementos Finitos, foram obtidos corpos de prova para ensaios de flexão com 50% de ABS, 49% de resina e 1% de fibra de carbono em volume, e tais corpos atingiram resistência à flexão de 112 MPa, valor superior a 210% do suportado pelos corpos somente em ABS. As peças projetadas e testadas ainda apresentaram baixa densidade, menor que $1,2 \text{ g/cm}^3$, preservando a geometria e dimensão externa, conforme projetado e fabricado por manufatura aditiva. O desenvolvimento do trabalho mostra a possibilidade de novas concepções em projeto de componentes mecânicos aliando a flexibilidade de formas da manufatura aditiva com reforço estrutural de materiais compósitos.

Palavras-chave: Projeto mecânico. Estruturas mecânicas. Manufatura aditiva. Materiais compósitos.

ABSTRACT

LOVO, J. F. P., **Design and manufacturing of mechanical components for additive manufacturing and internal structuring** – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

In the mechanical design activity the search for resistant, light weight and fast manufacturing components is recurrent. Composite materials and modern structures with mass reduction are employed in several products, and the development of the additive manufacturing allows complex geometries and enable new structural compositions. In this way, the present work aims to design and analyze the feasibility of pieces with internal structuring using complex internal geometries (empty spaces) generated by additive manufacturing and the mechanical resistance of reinforcement materials (filling the empty spaces) . For this purpose dense test specimens and test specimens with internal structural ducts filled by reinforcement material were designed, fabricated and tested (physically and virtually), those reinforced specimens were made by additive manufacturing and optimized to withstand higher stresses in the critical tests directions. Initially the ABS polymer was characterized in different printing orientations. A high mechanical strength epoxy resin and carbon fiber was also selected for reinforcement materials. Several configurations and proportions of the raw materials used in this study were also mechanically characterized for project referencing. From the main results obtained, the specimens filled with resin (5% in volume) reached flexural strength of 57 MPa, 8% higher than the bodies made only with printed ABS. After optimization steps of internal geometry using the Finite Element Method, flexural specimens were made with 50% ABS, 49% resin and 1% carbon fiber by volume, and those specimens achieved flexural strength of 112 MPa, higher than 210% of that supported by unreinforced ABS specimens. The designed and tested parts still presented low density, less than 1.2 g/cm³, preserving the geometry and external dimension as designed and obtained by additive manufacturing. The work development shows the possibility of new conceptions in mechanical components design combining the forms flexibility of additive manufacturing with structural reinforcement by composite materials.

Keywords: Mechanical design. Mechanical structures. Additive manufacturing. Composite materials.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama para seleção de materiais	26
Figura 2 - Perfis vigas. a) Perfil T. b) Perfil C. c) Perfil I. d) Perfil Caixaão. E) Perfil Tubular	28
Figura 3 - Estruturas de máquinas tradicionais. a) Estrutura inteiriça (fundida). b) Estrutura por união (parafusada)	30
Figura 4 - Desenho de asa de um VANT	31
Figura 5 - Honeycomb 3D	32
Figura 6 - Peça sólida fabricada por impressão 3D. a) Vista isométrica. b) Vista lateral	33
Figura 7 - Máquina patenteada para AM	34
Figura 8 - Esquema da fabricação por sinterização de polímero líquido	37
Figura 9 - Preenchimento de camadas consecutivas em FDM	37
Figura 10 - Dispositivo de fabricação por pó e aglomerante	38
Figura 11 - Dispositivo de fabricação por SLS	39
Figura 12 - Dispositivo de fabricação por LOM	39
Figura 13 - Tipos de compósitos reforçados com fibras. a) Fibras contínuas. b) Fibras em tecido. c) Fibras descontínuas. d) Híbridos	42
Figura 14 - Tipos de compósitos reforçados com particulados. a) Particulado em flocos. b) Particulado em pó	42
Figura 15 - Estrutura em fibra de carbono de um VANT	43
Figura 16 - Geometria importada de software CAD	44
Figura 17 - Malha de elementos finitos	45
Figura 18 - Restrições e carregamentos	45
Figura 19 - Resultados de deslocamento	47
Figura 20 - Impressora Dimension Elite da fabricante Stratasys®	49
Figura 21 - Dispositivo de flexão a três pontos	50
Figura 22 - Fluxograma das atividades práticas	51
Figura 23 - Direções de deposição de filamento em FDM. a) [90°]. b) [45°/-45°]. c) [0°/90°]	52
Figura 24 - Dimensões em milímetro do corpo de prova de tração ASTM D638 – tipo IV ..	52
Figura 25 - Dimensões em milímetro do corpo de prova de flexão ASTM C393	52

Figura 26 - Dimensões em milímetro do corpo de prova de compressão ASTM D695	52
Figura 27 - Corpo de prova de flexão com geometria interna projetada: Estrutura 1	55
Figura 28 - Corpo de prova de flexão com geometria interna projetada: Estrutura 2	57
Figura 29 - Corpos de prova de flexão com núcleo em resina	59
Figura 30 - Malha para ensaio EF. a) Corpo de prova inteiro. b) Detalhe canto inferior	59
Figura 31 - Desenho inicial <i>drone</i>	61
Figura 32 - Restrições e carregamentos para ensaio por EF	61
Figura 33 - Estrutura com furos para adição de material de reforço. a) Estrutura completa. b) Detalhe dos furos no braço	62
Figura 34 - Ensaio físico <i>drone</i>	63
Figura 35 - Resultados dos ensaios de tração das peças impressas	64
Figura 36 - Vista lateral da superfície de fratura corpo de prova [45°/-45°]	65
Figura 37 - Resultados dos ensaios de compressão das peças impressas	66
Figura 38 - Corpo de prova de flexão com geometria interna projetada – Estrutura 2	70
Figura 39 - Deformação total	70
Figura 40 - Tensões equivalentes de Von-Misses	71
Figura 41 - Detalhe da superfície de fratura da peça otimizada reforçada com resina	72
Figura 42 - Detalhe da superfície de fratura da peça otimizada reforçada com resina e fibras curtas de carbono	73
Figura 43 - Detalhe da superfície de fratura da peça otimizada reforçada com resina e fibras curtas de carbono	74
Figura 44 - Detalhe da superfície de fratura da peça otimizada reforçada com resina e fibras curtas de carbono	74
Figura 45 - Deformação total da estrutura do <i>drone</i> por MEF	75
Figura 46 - Comparativo rigidez e resistência das estruturas do <i>drone</i>	75
Figura 47 - <i>Drone</i> com estrutura reforçada com compósito	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Corpos de prova para infiltração com resina	54
Tabela 2 - Propriedades utilizadas para ensaios de EF	58
Tabela 3 - Resultados ensaio de tração do ABS impresso em 3D	65
Tabela 4 - Resultados ensaio de flexão do ABS impresso em 3D	65
Tabela 5 - Resultados ensaio de compressão do ABS impresso em 3D	66
Tabela 6 - Resultados ensaios resina LY 5052	67
Tabela 7 - Resultados ABS infiltração com resina – Sem geometria interna projetada	67
Tabela 8 - Resultados ABS infiltração com resina – Com geometria interna projetada	68
Tabela 9 - Resultados ensaio resina epoxi reforçada com fibras de carbono	68
Tabela 10 - Resultados ABS infiltração com resina reforçada com fibras curtas – Com geometria interna projetada	69
Tabela 11 - Resultados ABS infiltração com resina – Com geometria interna otimizada	71
Tabela 12 - Resultados ABS infiltração com resina e fibras de carbono – Com geometria interna otimizada	72

LISTA DE SIGLAS

3D	Tridimensional
3DP	<i>3D Print</i>
ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CLIP	<i>Continuous Liquid Interface Production</i>
DLP	<i>Digital Light Processing</i>
DSPC	<i>Direct Shell Production Casting</i>
FDM	<i>Fused deposition modeling</i>
LOM	<i>Laminated object manufacturing</i>
MEF	Método dos elementos finitos
SI	Sistema Internacional de Unidades
SLA	<i>Stereolithography</i>
SLS	<i>Selective laser sintering</i>
STL	<i>Stereolithography format</i>
UV	Ultravioleta
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

LISTA DE SÍMBOLOS

k	Rigidez
F	Força
δ	Deformação total
®	Marca registrada
kN	Quilonewton
D	Diâmetro
L	Comprimento
mm	Milímetro
μm	Micrômetro
g	Grama
cm	Centímetro
Torr	Torricelli
min	Minuto
°C	Grau Celsius
MPa	Megapascal
GPa	Gigapascal
mPa	Milipascal
s	Segundo
Hz	Hertz

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	23
1.1	Objetivos.....	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1	Estrutura de Máquina.....	25
2.1.1	Propriedades	25
2.1.2	Estruturas tradicionais de máquinas	29
2.1.3	Estruturas modernas máquinas	30
2.1.4	Estrutura celular	31
2.2	Manufatura Aditiva.....	32
2.2.1	Histórico	33
2.2.2	Principais técnicas de manufatura aditiva	36
2.2.3	Vantagens e utilização.....	39
2.3	Materiais Compósitos	41
2.3.1	Compósitos reforçados com fibras	41
2.3.2	Compósitos reforçados com particulados	42
2.4	Elementos finitos	43
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
3.1	Materiais	48
3.2	Métodos	50
3.2.1	Caracterização do ABS	51
3.2.2	Caracterização da resina epoxi	53
3.2.3	ABS infiltrado com resina – Sem geometria interna projetada.....	54
3.2.4	ABS infiltrado com resina – Com geometria interna projetada	55
3.2.5	Resina com fibra de carbono	55
3.2.6	ABS com estrutura interna preenchida com compósito	56
3.2.7	Modelagem por elementos finitos e otimização.....	57
3.2.8	ABS com estrutura interna otimizada preenchida com compósito	60
3.2.9	Estrutura mecânica para validação do conceito de projeto estudado	60
4	RESULTADOS PARCIAIS E DISCUSSÃO	64
4.1.1	Caracterização do ABS	64

4.1.2	Caracterização da resina epoxi	66
4.1.3	ABS infiltrado com resina – Sem geometria interna projetada.....	67
4.1.4	ABS infiltrado com resina – Com geometria interna projetada	68
4.1.5	Caracterização da resina com fibra de carbono.....	68
4.1.6	ABS composto com resina e fibra de carbono	69
4.1.7	Modelagem e otimização por EF	69
4.1.8	ABS com estrutura interna otimizada preenchida com compósito	72
4.1.9	Estrutura mecânica para validação do conceito de projeto	74
5	CONCLUSÕES	77
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

1 INTRODUÇÃO

A prática do projeto mecânico e o desenvolvimento de produtos em geral exigem continuamente a melhoria e aplicação de elementos leves e resistentes. Em especial nos dispositivos mecânicos, onde ainda a rigidez estrutural é uma exigência comum (LIANG et al., 2013; WANG, 2014), e segundo Labeas e Ptochos (2015), a escolha adequada do material e estrutura interna podem resultar em peças de boa rigidez e resistência mecânica, aliados à leveza do produto.

Pesquisadores têm focado na melhora da relação entre propriedades mecânicas e densidade, em especial para projetos em que o baixo peso e baixo consumo energético do produto final são primordiais. Ligas metálicas leves e compósitos reforçados com fibras diversas são exemplos de materiais estruturais leves amplamente estudados na engenharia moderna. Mas não só os materiais, como também as geometrias são alvo de estudos, por exemplo, os *honeycombs* e outras possibilidades de estruturação interior são exemplos de desenvolvimento em eficiência na engenharia das estruturas, porém, apresentam limitações geométricas inerentes ao processo de fabricação (CHEN et al., 2009; CHANTARAPANICH et al., 2014; COMPTON; LEWIS, 2014).

A necessidade de componentes com desenhos complexos, fabricação rápida, autônoma, aplicações personalizadas e produção acessível impulsionou os avanços da manufatura aditiva nas últimas décadas. Além disso, os *softwares* e máquinas de impressão 3D atuais possibilitam projetos inovadores em várias áreas da ciência (KOLESKY et al., 2014; GIBSON; IAN; ROSEN, 2014; TUMBLESTON et al., 2015). Os trabalhos de Ning et al., (2015) e Christiyan et al., (2016) apresentam exemplos do desenvolvimento de materiais, aliado à manufatura aditiva, que dão novas possibilidades estruturais aos projetistas. O processo de manufatura aditiva também permite a fabricação de produtos com desenhos internos adequados para alocação/impregnação de materiais que garantem propriedades mecânicas, elétricas e térmicas específicas para determinadas aplicações (MALEKSAEEDI et al., 2014; LUO; HOANG; LIU, 2015; BASZYNSKI et al., 2016), ou até mesmo para acomodação de componentes como dutos, cabos e eixos.

A infiltração de resina em peças impressas é uma prática usual para melhoria da resistência dos produtos; e as resinas podem ainda ter suas propriedades mecânicas elevadas quando compostas com elementos de reforço, como relatado por Mao (2011).

O projeto de peças diversas fabricados por manufatura aditiva com canais estruturais internos, e posteriormente preenchidos com material compósito, de modo que essa estrutura

interna do produto seja otimizada para suportar os esforços em serviço, se apresenta como uma alternativa valiosa, abrindo novas possibilidades na criação e desenvolvimento de componentes mecânicos estruturais.

1.1 Objetivos

O objetivo principal do presente trabalho é o desenvolvimento de uma nova possibilidade de projeto que conjuga a alta flexibilidade de geometria da manufatura aditiva, com a estruturação interna planejada com materiais compósitos.

Objetivos específicos são:

- Projeto, fabricação e caracterização mecânica e física de corpos de prova confeccionados por manufatura aditiva.
- Infiltração com resina polimérica e caracterização mecânica de corpos prototipados.
- Formulação de materiais compósitos dedicados ao preenchimento de canais de geometrias particulares, fabricação de corpos de prova e caracterização mecânica.
- Fabricação de peças com vazios internos equivalentes a estruturas tridimensionais, preenchimento com compósito e caracterização mecânica.
- Projeto e simulação por elementos finitos de modelos de estruturas internas.
- Projeto, fabricação e ensaio de componente mecânico para validação do conceito do projeto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estrutura de Máquina

A estrutura de um dispositivo mecânico tem papel fundamental em seu funcionamento e desempenho. O conjunto estrutural de uma máquina, de qualquer tamanho e complexidade, deve ser pensado de modo a resistir aos esforços mantendo a integridade e rigidez adequada em serviço, além de atender às necessidades específicas de cada dispositivo e às boas práticas de projeto (SHIGLEY; MISCHKE, 1996; LIANG et al., 2013).

A atividade de projeto mecânico atual conta com ferramentas computacionais que permitem o projeto refinado, bem como a verificação virtual das propriedades e comportamento mecânico do elemento em serviço (WANG, 2014). Além disso, a possibilidade de uso de materiais estruturais modernos e novas técnicas de fabricação e montagem permitem aos projetistas conceber estruturas mais eficientes para grande maioria das máquinas.

2.1.1 Propriedades

As propriedades dos elementos estruturais requeridas em um projeto dependem dos materiais empregados e da forma como tal material se apresenta (devido ao processo de fabricação, geometria, dimensional, qualidade superficial, dentre outros). Segundo Ashby (2005), as principais propriedades a serem consideradas em projeto de engenharia genérico podem ser agrupadas em: gerais, mecânicas, térmicas, resistência ao meio, elétricas, ópticas e ambientais.

A densidade e o preço por quilograma são duas propriedades ditas gerais importantes a serem consideradas por um projetista para seleção de elementos estruturais, sendo características básicas na concepção de uma máquina. Custo final da estrutura (levando em consideração material e processo de fabricação), bem como a massa de tais elementos devem ser condizentes com a função do dispositivo onde serão empregados.

Das propriedades mecânicas, a rigidez é a mais importante em grande parte dos elementos estruturais em equipamentos. Por definição, rigidez é a resistência à variação dimensional de um corpo quando uma força é aplicada ao mesmo. Tal propriedade mecânica influi diretamente na capacidade das máquinas desempenharem sua função e na qualidade do trabalho (KLEBANOV; BARLAM; NYSTROM, 2008; WANG, 2014). A rigidez estrutural

interfere, por exemplo, na precisão, tolerância, linearidade e dinâmica vibracional dos dispositivos mecânicos.

A rigidez (k) de um corpo em uma dada direção é expressa por:

$$k = \frac{F}{\delta}$$

sendo F a componente de força na direção de interesse, em Newtons pelo Sistema Internacional de Unidades (SI), e δ a variação linear sofrida na mesma direção, em metros (SI). A rigidez em cada direção de uma estrutura complexa pode ser calculada pela combinação das rigidezes dos elementos ou áreas constituintes.

Material e geometria são dois parâmetros com os quais o projetista consegue obter a rigidez adequada de cada elemento estrutural de um equipamento. De acordo com a necessidade de projeto, é possível escolher dentre uma enorme gama de materiais disponíveis no mercado, com propriedades bem definidas e catalogadas (LUCISANO; STEFANOVIC; FRAGASSA, 2016; ASHBY, 2005). Registros disponíveis na literatura ajudam na tarefa de seleção de materiais de acordo com suas propriedades, por exemplo, a Figura 1 traz um diagrama conhecido, de Ashby (2005), que orienta a escolha de material para construção mecânica, baseado na rigidez necessária e densidade da matéria-prima.

Fonte: Ashby, (2005).

Quatro propriedades mecânicas habitualmente requeridas em projetos de engenharia são resistência à tração, compressão, flexão e torção, tais propriedades se referem à capacidade de suportar esforços em determinadas direções sem falhar. As informações sobre limites de resistências mecânicas para diversos materiais de engenharia estão disponíveis na literatura (SHIGLEY; MISCHKE, 1996; ASHBY, 2005).

Em especial nos projetos de dispositivos mecânicos, a resistência à flexão de elementos é de grande importância. Por exemplo, em máquinas operatrizes com guias longitudinais tais guias precisam suportar os esforços de flexão gerados em serviço, assim como pontes rolantes precisam ter resistência aos esforços de flexão decorrente das forças em sua estrutura durante o trabalho. Mesmo em dispositivos menores, sob menores esforços, como a carcaça de um *drone*, também precisam ser levados em consideração esforços fletores. Monzon et al., (2015) apresentam um exemplo de elemento mecânico, (pedal de automóvel), sob esforço de flexão e ações de projeto para garantia da resistência mecânica do elemento frente às condições de trabalho.

A geometria da seção transversal influi diretamente na resistência à flexão final do elemento estrutural. Levando em consideração a seguinte equação de Hibbeler (2004):

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M.c}{I}$$

onde $\sigma_{m\acute{a}x}$ é a tensão normal máxima no elemento, que ocorre no ponto da área da seção transversal mais distante do eixo neutro; M é o momento fletor interno resultante, determinado pelo método das seções e pela equação de equilíbrio, e calculado em torno do eixo neutro da seção transversal; c é a distância perpendicular do eixo neutro da seção transversal ao ponto mais afastado desse eixo, no qual $\sigma_{m\acute{a}x}$ atua; I é o momento de inércia da área da seção transversal calculado em torno do eixo neutro da seção. Então, um maior momento de inércia da seção transversal contribui para maior resistência de uma viga a um esforço de flexão.

Tendo em vista o momento de inércia em elementos que trabalham submetidos a carregamentos que causam flexão, diversos perfis de seção transversal podem ser considerados. Alguns perfis usuais em elementos estruturais estão apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Perfis vigas. a) Perfil T. b) Perfil C. c) Perfil I. d) Perfil Caixão. E) Perfil Tubular.

Fonte: Adaptado de Hibbeler, (2004).

As geometrias das seções transversais apresentadas na Figura 2 são frequentemente empregadas para atingir maior momento de inércia da área da seção, em comparação com perfis com a mesma área de seção, porém com geometria mais simples (por exemplo uma seção quadrada ou circular). Assim, a configuração geométrica adotada nos elementos estruturais tem papel fundamental na resistência à flexão.

A rugosidade é outra propriedade considerável no projeto de certas estruturas de máquinas. A rugosidade tolerada na superfície de um elemento mecânico depende da função desempenhada por tal (SHIGLEY; MISCHKE, 1996), e ainda pode contribuir para o início de trincas que culminem na falha da estrutura da máquina.

Outra propriedade mecânica importante bastante descrita na literatura é a capacidade de amortecimento de vibrações. Os materiais e configurações escolhidas para construção de um dispositivo mecânico devem ser capazes de amortecer as vibrações para que tais não prejudiquem o desempenho da máquina (AGGOGERI et al., 2017).

Das propriedades térmicas a serem consideradas em um projeto de estrutura de máquina, a condutividade térmica e coeficiente de expansão térmica, têm papel importante na causa de distorções em elementos de máquinas, como discutido por (SHIGLEY; MISCHKE, 1996). A composição estrutural de um dispositivo mecânico deve permitir dispersão de calor de modo a evitar distorções térmicas que comprometam o correto funcionamento de tal dispositivo, nesse sentido, a condutividade térmica do material constituinte deve possibilitar o adequado fluxo de calor. Da mesma forma, o coeficiente de expansão térmica do material empregado em estruturas de máquinas também não deve ser demasiadamente elevado, para evitar que variações de temperatura em serviço prejudiquem o desempenho da máquina.

As propriedades referidas como de resistência ao meio são em especial relativas à taxa de oxidação, taxa de corrosão e taxa de desgaste por efeito tribológico. Tais propriedades podem ser quantificadas baseado em massa de material perdido por um corpo por unidade de tempo, porém, tal quantificação não é trivial devido ao grande número de fatores envolvidos como dinâmica de fluidos no ambiente de trabalho, interações químicas, dinâmica

multicorpos (ASHBY, 2005). Na atividade de elaborar estruturas de dispositivos mecânicos, interações com o meio devem ser consideradas para se evitar falhas prematuras.

Das propriedades ambientais, se destacam quantidade de dióxido de carbono e energia gasta em todo o ciclo de vida do produto (ASHBY, 2005), e na engenharia moderna diversos esforços são feitos no sentido de diminuir o impacto ambiental de um produto, em sua produção, distribuição, vida útil e descarte. Como discutido por Souza et al. (2017), a utilização de material descartado por alguns processos industriais se mostra como alternativa interessante para redução do impacto ambiental na engenharia de um produto estrutural. O projeto de máquinas modernas, tendo em vista o impacto ambiental do produto em seu ciclo de vida, deve ser feito também se prevendo como será feito o descarte ou reuso do material estrutural empregado.

Outras propriedades e características comumente em foco durante a elaboração de estruturas para dispositivos mecânicos são usinabilidade, soldabilidade, condutividade elétrica e resistência ao impacto (ASHBY, 2005; LUCISANO; STEFANOVIC; FRAGASSA, 2016). Tais características também se relacionam, em maior ou menor grau, ao material e à geometria empregada na construção do objeto final.

2.1.2 Estruturas tradicionais de máquinas

As estruturas de máquinas usuais podem ser divididas, genericamente, em dois grandes grupos: estruturas inteiriças e estruturas por uniões. As inteiriças são em geral de maior rigidez e menor complexidade, como por exemplo, estruturas em ferro fundido e injetadas em polímeros de engenharia, já as estruturas por uniões podem ser menos rígidas e permitem maior complexidade de construção (SHIGLEY; MISCHKE, 1996; MESSLER, 2004; ASHBY, 2005).

Os esqueletos inteiriços são comuns em grandes máquinas operatrizes e são usados para garantir rigidez necessária ao trabalho bem como suporte das grandes cargas estáticas e dinâmicas em serviço. Por exemplo, como discutido por Albano et al. (1999), o ferro fundido (fofo) é o material estrutural mais utilizado pela indústria de máquinas ferramenta devido às suas boas propriedades gerais e facilidade de confecção por fundição. Outro material utilizado em estruturas inteiriças e com geometrias menos complexas é o granito sintético, um compósito de matriz polimérica bastante conhecido pela capacidade de absorção de vibrações, interessante para máquinas operatrizes, e baixa massa específica em comparação com fofo e

aço (FRANCESCHINI; GOMES, 2010; SUBRAHMANYA SWAMY et al., 2014; LOVO et al., 2018).

Limitações recorrentes nesse tipo de construção são a necessidade de ângulos de saída de fundição, custo dos moldes, peso da peça final e necessidade de grande aparato fabril para produção de máquinas com tais estruturas.

As estruturas por união (por exemplo, soldadas, rebitadas ou parafusadas), geralmente requerem menor investimento em infraestrutura e equipamentos para fabricação, permitem montagem parcial ou total em campo, e ainda possibilitam maior variedade de geometrias construtivas, bem como ajustes de fabricação e substituição de partes durante a manutenção da máquina. Desvantagens geralmente encontradas nesse tipo de construção são distorções geométricas e dimensionais causadas pelo processo de fabricação, não adequada rigidez para solicitações mecânicas pesadas, necessidade de acesso para montagem, dependência da habilidade do operador e maior número de peças e operações para fabricação.

A Figura 3 mostra um exemplo de uma estrutura inteiriça (fundida) e uma por união (parafusada).

Figura 3– Estruturas de máquinas tradicionais. a) Estrutura inteiriça (fundida). b) Estrutura por união (parafusada).

Fonte: Autor.

2.1.3 Estruturas modernas máquinas

No conceito de engenharia moderna os equipamentos devem ter dimensões e peso compatíveis com os produtos e ambientes de produção com os quais tal equipamento trabalha (MEHRABI; ULSOY; KOREN, 2000; THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING, 2010).

Grande parte das máquinas modernas tem suas dimensões definidas de modo a atender sua função de projeto com um menor gasto de material para sua fabricação e reduzido volume a ser ocupado no ambiente de serviço onde tal máquina será instalada. Eguia, Uriarte

e Lamikiz (2016) apresentaram em seu trabalho uma otimização estrutural de um dispositivo mecânico de dimensões reduzidas. O trabalho de Netto e Silveira (2015) discute a concepção de um dispositivo de manufatura aditiva portátil, de baixo custo e apresenta a discussão sobre um conceito de mini máquina moderna.

A prática do projeto de estruturas modernas de máquinas recorrentemente busca alívio de massa tendo em vista reduções de custo de fabricação e menor consumo energético no serviço do equipamento. Almeida (2007) e Moon et al. (2014) apresentaram exemplos de otimização de massa em estruturas de dispositivos mecânicos modernos e em seus trabalhos discutem as vantagens de redução de massa em tais equipamentos e as técnicas computacionais e processos de fabricação modernos que auxiliam o processo de engenharia de estruturas de máquinas na engenharia atual.

A Figura 4 apresenta uma imagem da estruturação da asa de um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), exemplo de estrutura mecânica projetada com foco em leveza.

Figura 4 – Desenho de asa de um VANT.

Fonte: Moon et al., (2014).

2.1.4 Estrutura celular

As estruturas celulares propiciam apreciáveis propriedades mecânicas aliadas a uma densidade reduzida. Ashby (2005) divide tais estruturas em dois tipos: as espumas e os reticulados tridimensionais, sendo as espumas caracterizadas por contornos internos curvos, randômicas e menos densas, já as estruturas reticuladas são caracterizadas por contornos internos retilíneos, planejados e áreas resistivas internas mais consideráveis. Essas geometrias internas do elemento podem ser feitas de modo a favorecer, por exemplo, a rigidez, amortecimento de vibrações, amortecimento de impactos e resistência á compressão (COMPTON; LEWIS, 2014).

Exemplo usual desse tipo de material estruturado são os *honeycombs*, inspirados nas geometrias dos favos de mel, são amplamente empregados no setor aeronáutico e projetos estruturais quando leveza e resistência mecânica são requeridas. O trabalho de Chantarapanich et al., (2014) cita aplicações desse material com diversas configurações e variações disponíveis no mercado, tradicionalmente constituídas de um miolo reticulado baseado em extrusão e faces superior e inferior fechadas, e ainda, analisa desenho e confecção de “*honeycombs* tridimensionais” como apresentado na Figura 5. Tais configurações em 3D garantem vantagens tanto em alívio de massa quanto em propriedades construtivas e mecânicas para produtos nos quais são empregadas, e o projeto delas deve priorizar o menor numero de faces em cada célula constitutiva e a simetria.

Figura 5 – Honeycomb 3D.

Fonte: Chantarapanich et al., (2014).

A absorção de impactos é outra característica possível utilizando estruturas celulares. Os chamados “*honeycombs* de rigidez negativa” trabalham com dois estágios de compressão, um primeiro estágio com rigidez elevada e um segundo estágio de deformação interna com elevada capacidade de armazenamento de energia potencial. Tais materiais podem voltar à forma original após grandes deformações, liberando ainda parte da energia armazenada durante a compressão (CORREA et al., 2015).

2.2 Manufatura Aditiva

Manufatura Aditiva (AM) é definida como processo de fabricação por adição de material pelo qual um produto pode ser diretamente fabricado a partir de um modelo 3D computacional (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2013; TANG; ZHAO, 2016). O processo também é referido por outros termos, tais como Prototipagem Rápida, *Digital Manufacturing*, e Impressão 3D (EYERS; POTTER, 2015). Técnicas de

fabricação por adição de material vêm sendo criadas e melhoradas nas últimas décadas e contribuindo para o desenvolvimento de novos produtos ao redor do globo.

2.2.1 Histórico

Em 1981, o pesquisador Hideo Kodama publicou dois trabalhos nos quais documentou a fabricação de objetos em resina fotopolimerizável, camada a camada, com equipamentos que utilizavam lâmpadas de mercúrio e xenônio como fonte de radiação luminosa. Tal método possibilitou a confecção de peças poliméricas para validação com pouco tempo, baixo custo e sem excessivo trabalho manual (KODAMA, 1981). Na Figura 6 são apresentadas duas imagens de uma peça tetraédrica feita por manufatura aditiva (dimensões 20 x 20 x 12,5 mm) feitas por Hideo K.

Figura 6 - Peça sólida fabricada por impressão 3D. a) Vista isométrica. b) Vista lateral.

Fonte: Adaptado de Kodama, (1981).

Três anos depois, na França, foi depositada a possível primeira patente de uma máquina de manufatura aditiva. Andre; Le Mehaute e De Witte, (1984) engendraram um dispositivo baseado em estereolitografia, no qual um cabeçote que se movimenta em três eixos aplicando a radiação gerada por um laser, solidificando um polímero fotossensível. Tal radiação varre planos dentro da cuba de matéria prima, de acordo com os movimentos das guias cartesianas gerenciadas por um controlador que segue um algoritmo de fabricação, formando camadas polimerizadas as quais constituem um produto ao final do processo. A Figura 7 ilustra o invento.

Figura 7 – Máquina patenteada para AM.

Fonte: Adaptado de Andre; Le Mehaute e De Witte, (1984).

Também em 1984, nos Estados Unidos, Charles W. Hull, que viria a ser cofundador da empresa 3D Systems®, depositou uma patente de um aparato para fabricação de objetos tridimensionais usando estereolitografia (HULL, 1986; GIBSON; ROSEN; STRUCKER, 2014). O primeiro equipamento de impressão 3D a ser comercializado foi o modelo SLA-1 da empresa 3D Systems®, em 1986, precursor do modelo SLA-250 que teve vendas expressivas na década seguinte. Ainda no final dos anos 80, as companhias japonesas NTT Data e Sony/D-MEC lançaram seus modelos de impressoras 3D, e em 1990 a alemã EOS colocou no mercado o modelo Stereos, todas baseadas em fabricação por estereolitografia (ALMEIDA, 2007).

Em 1989 S. Scott Crump, fundador da fabricante Stratsys®, depositou a patente americana de um dispositivo de manufatura aditiva baseada em deposição de material fundido (CRUMP, 1992), e três anos depois foi lançado o modelo 3D Modeler Stratsys®, pioneiro dentre as impressoras comerciais da tecnologia de Modelagem por Fusão e Deposição, referida pela sigla em inglês FDM (*Fused deposition modeling*).

Entre 1990 e 1992 começaram a ser comercializados equipamentos de manufatura aditiva do tipo LOM (*Laminated object manufacturing*), baseados na fabricação de objetos por camadas de papeis cortadas a laser. A empresa precursora no mercado com esse processo foi a Helisys Corporation. Nesse mesmo período a norte-americana DTM e a japonesa Teijin Seiki começaram as vendas de impressoras 3D tipo SLS (*Selective laser sintering*), que utilizavam sinterização seletiva a laser de pós, tecnologia inicialmente desenvolvida na University of Texas, de (CUNICO, 2013; GIBSON; ROSEN; STRUCKER, 2014).

A fabricante americana Soligen introduziu no mercado, em 1993, máquinas que utilizavam um mecanismo de jato de tinta para depositar líquido aglomerante (*binder*) em pós cerâmicos para formar as camadas de impressão, conhecido como DSPC (*Direct Shell*

Production Casting), processo desenvolvido e patenteado pelo *Massachusetts Institute of Technology*. Poucos anos depois a Zcorporation introduziu no mercado suas impressoras também baseadas em pós cerâmicos (GIBSON; ROSEN; STRUCKER, 2014).

A Sanders Prototype lançou em 1994 um dispositivo com cabeçote térmico que deposita seletivamente gotas de material a base de cera para construção de objetos camada a camada. No mesmo ano outras empresas, nos EUA, Europa e Japão, começaram a comercialização de impressoras 3D baseadas em técnicas de manufatura aditiva previamente desenvolvidas. Na segunda metade da década de 1990 diversas empresas norte-americanas, europeias e asiáticas lançaram-se nesse mercado, aprimorando as técnicas de prototipagem previamente elaboradas (CUNICO, 2013).

No primeiro ano da década de 2000 as impressoras Zcorp já eram capazes de imprimir peças coloridas, com a pigmentação do *binder*. No ano seguinte a Solidimension, de Israel, começou a produzir um equipamento de manufatura por meio de laminação de polímero PVC, essas máquinas se destacavam pelo seu tamanho reduzido em comparação com antecessoras. Já em 2002, resultados de pesquisas com bio-impressão, empolgaram cientistas do mundo todo sobre as possibilidades da impressão 3D na área médica (WOHLERS; GORNET, 2014).

O projeto “RapRap”, idealizado por um grupo da University of Bath na Inglaterra, marcou o ano de 2004 para a manufatura aditiva. A iniciativa lançou máquinas FDM de bancada com projeto e *software* abertos, capazes de produzir componentes para outras impressoras, com a intenção de replicá-las. Dois anos depois foi lançado um projeto semelhante por um grupo da universidade americana Cornell University (GIBSON; ROSEN; STRUCKER, 2014). Tais projetos atraíram entusiastas do mundo todo, disseminando e desenvolvendo a prática da manufatura aditiva, bem como a integração entre consumidores da tecnologia.

Desde meados da década de 90 as pesquisas e inovações tiveram grande enfoque no aprimoramento dos materiais e precisão geométrica da impressão 3D. Por exemplo, a DSM Somos® apresentou impressoras para moldes em resina para injeção de polímeros. Em 2007, a Connex500 da Objet Geometries surgiu como a primeira impressora 3D multimaterial. No ano posterior a Stratasys® disponibilizou o ABS-M30i, material esterilizável adequado para fabricação de ferramentas cirúrgicas. Outra ação percebida das empresas no período foi o desenvolvimento de tecnologias de menor custo para o mercado educacional e amador, bem como vendas via comércio eletrônico. Em 2011 a italiana CRP Technology apresentou Windform XT 2.0, dispositivo que fabrica em material composto com fibra de carbono

(WOHLERS; GORNET, 2014). A primeira impressora 3D brasileira a ser comercializada foi a CL-1 da empresa Cliever, lançada em 2012, e utiliza o processo FDM (RODRIGUES, 2013).

Tecnologias de manufatura aditiva empregando fotopolimerização de resinas voltaram a ser bastante exploradas na segunda metade da década de 2010. Por exemplo, a DLP (*Digital Light Processing*), discutida por Olmos et al., (2017), é uma técnica de manufatura aditiva baseada em fotopolimerização que ganhou notoriedade no meio acadêmico e na mídia especializada. A DLP se destaca pela simplicidade construtiva das máquinas e rapidez da manufatura em comparação com outras técnicas de impressão 3D.

O aprimoramento de técnicas de manufatura, novos materiais, cooperação entre usuários, pesquisas acadêmicas bem como novos tipos de negócio baseados nesse processo de fabricação marcaram o desenvolvimento da técnica e mudanças nos ambientes fabris nos últimos anos.

2.2.2 Principais técnicas de manufatura aditiva

As técnicas de fabricação por manufaturar aditiva são diversas e com peculiaridades, porém, é possível classificá-las quanto ao tipo de material utilizado em: polímeros e compósitos líquidos; material fundido; partículas discretas e sólidos laminados (CUNICO, 2013; GIBSON; ROSEN; STRUCKER, 2014).

- **Polímeros e compósitos líquidos:**

Essa linha de manufatura aditiva, tipicamente, faz uso da fotopolimerização. No processo, uma resina fotopolimerizável é usada como material base, e uma fonte de radiação (laser, luz branca, fonte UV) é usada para solidificação do material. O foco da incidência luminosa no volume da resina é controlado por um conjunto, óptico e/ou guias, que garantem a precisão do caminho de solidificação dentro do volume líquido, referente à construção da peça (VOLPATO, 2007; TUMBLESTON et al., 2015). Tal processo requer o uso de materiais fotopolimerizáveis.

Exemplos de técnicas de manufatura aditiva que utilizam polímeros e compósitos de matriz líquida são a Estereolitografia (SLA), produção contínua de interface líquida (CLIP) e Fotopolimerização por máscara de projeção (CUNICO, 2013; TUMBLESTON et al., 2015). A Figura 8 ilustra o processo SLA.

Figura 8 – Esquema da fabricação por sinterização de polímero líquido.

Fonte: Adaptado de Gibson, Rosen e Strucker (2014).

- Material fundido:

Nesse tipo de processo de AM o produto é fabricado pela deposição de material fundido, em geral um termoplástico, a partir de um cabeçote extrusor. O processo tipicamente se inicia pela extrusão de filamentos de material, a partir de um bico extrusor, sobre uma plataforma de fabricação, formando a primeira camada do componente em fabricação. Após essa etapa a plataforma é rebaixada na medida da espessura de camada da peça, então é depositada uma nova camada de material que se une com a feita anteriormente. O procedimento se repete até o fim da construção do produto. (ZIEMIAN; CRAWN III, 2001; CUNICO, 2013; LOVO; FORTULAN, 2016).

As máquinas tipo FDM são as mais comuns de manufatura aditiva utilizando material fundido. A Figura 9 mostra o esquema de deposição por FDM de duas camadas de fabricação consecutivas.

Figura 9 – Preenchimento de camadas consecutivas em FDM.

Fonte: Lovo e Fortulan, (2016).

- Partículas discretas:

Os processos de manufatura aditiva dessa classe são geralmente com pós (metálicos, poliméricos ou cerâmicos), de tamanho uniforme, sinterizados ou aglutinados camada a

camada para construção do produto final. As duas principais técnicas com partículas discretas são SLS e 3DP.

Na técnica conhecida como 3DP uma fina camada de pó é espalhada na plataforma de impressão e logo depois um cabeçote passa depositando aglomerante (*binder*), de modo a formar a camada de impressão, a plataforma de impressão se rebaixa na espessura da camada e o processo se repete até a conclusão da peça. Após o término a peça é removida do envoltório de pó não aglutinado, que serviu de suporte para impressão e pode ser reutilizado em outras fabricações (PEDERSEN; HANSEN; EIRÍKSSON, 2015; CAO et al., 2015). A Figura 10 exemplifica um dispositivo de fabricação por aglomeração de pó.

Figura 10 - Dispositivo de fabricação por pó e aglomerante.

Fonte: Adaptado de Gibson, Rosen e Strucker, (2014).

Nas máquinas por processo de Sinterização Seletiva a Laser (SLS), também uma fina camada de pó, de granulometria adequada, é espalhada sobre a plataforma de impressão e então o foco de um laser, de movimento planar controlado, percorre a superfície da matéria prima sinterizando a camada de impressão, então a plataforma de impressão é abaixada na espessura da camada e o processo se repete até a finalização do produto. O pó não sinterizado serve de suporte durante a fabricação da peça e pode ser reaproveitado em futuras fabricações (OLAKANMI; COCHRANE; DALGARNO, 2015; SHIRAZI et al., 2015). Na Figura 11, um desenho esquemático do processo SLS.

Figura 11 – Dispositivo de fabricação por SLS.

Fonte: Adaptado de Volpato, (2007).

- Sólidos laminados:

A fabricação por adição de material sólido laminado, conhecida pela manufatura aditiva LOM, baseia-se no empilhamento de lâminas de matéria-prima (metal, polímero, cerâmica ou compósito), referentes às camadas da peça final. Para o corte das lâminas de material, em geral, é usado laser que recorta folhas de matéria prima de acordo com o contorno de cada camada da peça. As camadas são unidas umas às outras por um adesivo que depende do tipo de material empregado na fabricação. Uma subclassificação dessa tecnologia é referente à sequência de fabricação, (corte-deposição ou deposição-corte), dependendo se o recorte de cada camada é feito antes ou depois da junção com a camada anterior (NETTO; SILVEIRA, 2015; GAO et al., 2015). No desenho esquemático a seguir, Figura 12, está ilustrado o processo LOM.

Figura 12 – Dispositivo de fabricação por LOM.

Fonte: Volpato, (2007).

2.2.3 Vantagens e utilização

A manufatura aditiva abriu novas possibilidades de projeto e confecção em várias áreas da ciência. Usuários caseiros, empresas e centros de pesquisa se beneficiam e ajudam

criar novos negócios e produtos baseados em manufatura aditiva. De acordo com Gao et al. (2015), a impressão 3D vem mudando a forma de concepção de produtos, fabricação e distribuição para o usuário final. A tecnologia permite criação de formas, uso de materiais e obtenção de características físicas apuradas, também inspira o auto desenvolvimento por integração e *feedback* dos usuários, e ainda, inspira novos tipos de negócios e distribuição de produtos, pois os usuários podem fabricar os itens de necessidade *in loco*, com apenas uma máquina e o arquivo de computador referente à peça desejada.

O caráter anisotrópico conferido às peças impressas em 3D, inerente ao processo de fabricação por camadas, é uma característica importante a ser observada. Algumas técnicas como FDM geram itens com resistência mecânica fortemente variável conforme a direção de aplicação dos esforços em relação às direções de deposição de material durante a confecção do produto. Porém, informações sobre limites de tensões disponíveis, por exemplo, em artigos científicos e catálogos de fornecedores de máquinas e material de impressão 3D dão subsídios para se projetar adequadamente peças de acordo com as direções de esforços em trabalho.

Vantagens importantes da manufatura aditiva em relação às técnicas tradicionais de fabricação, segundo Gibson, Rosen e Strucker (2014), Gao et al., (2015) e Shinrazi et al., (2015), são:

- Rápida fabricação de peças unitárias, protótipos e ferramental.
- Menor desperdício de matéria-prima.
- Redução de etapas de fabricação e retrabalho.
- Fabricação de geometrias complexas.
- Máquinas fáceis de operar.
- Possibilidades de melhorias na logística de confecção e distribuição de produtos.

Dispositivos com geometrias internas difíceis, ou mesmo inviáveis, de serem feitas por processos clássicos de fabricação são utilizados em diversas áreas da ciência e tecnologia. Por exemplo, as estruturas tridimensionais impressas utilizadas por Kolesky et al., (2014) para analisar o crescimento de células, tais estruturas tem desenho interno adequado à proliferação celular e auxilia em diversas pesquisas biológicas. *Honeycombs 3D* fabricadas por manufatura aditiva metálica aliam resistência mecânica e baixo peso específico, sendo objeto de pesquisa para elementos estruturais na indústria aeronáutica (CHANTARAPANICH et al., 2014). Peças projetadas com desenhos estruturais internos específicos, como discutido por Correa et al., (2015), propiciam grande capacidade de absorção de impacto, tais peças tem uma movimentação da geometria interna de modo a absorver e dissipar energia quando sofre uma

compressão abrupta. Monzon et al., (2015) preencheu espaços vazios, em peças feitas por SLS, com resina para melhorar a resistência mecânica das mesmas.

Diversos outros exemplos da literatura demonstram o uso da capacidade de fabricação de desenhos complexos no interior de objetos, e o aproveitamento dessa característica em diversas pesquisas.

2.3 Materiais Compósitos

Os materiais estruturais são divididos usualmente em quatro categorias: metais, polímeros, cerâmicas e compósitos. Os compósitos são obtidos pela combinação de dois ou mais materiais distintos, sendo geralmente uma matriz e um ou mais componentes de reforço. Estruturas em materiais compósitos estão entre as mais importantes na engenharia moderna, especialmente quando resistência e leveza são requeridas. (ASHBY, 2005; SAYYAD; GHUGAL, 2015).

Na constituição dos compósitos o material de reforço fornece a resistência mecânica, e o material matriz é o meio de transferência desse esforço e alocação do reforço. De uma maneira geral os compósitos podem ser divididos em duas subcategorias, de acordo com o tipo de reforço, se com fibras ou particulados.

2.3.1 Compósitos reforçados com fibras

Compósitos com fibra de vidro e de carbono são materiais usualmente lembrados quando se fala dessa classe de material, são exemplos de compósitos reforçados com fibra, e remetem a usos modernos. Porém, a literatura cita uso de reforços de fibras de palha em tijolos há milhares de anos (ASHBY, 2005). Esse tipo de material ordinariamente é formado por uma matriz com inclusão de fibras de comprimento muito maior que o diâmetro ($L \gg D$), bem mais resistentes mecanicamente que a matriz. Tais fibras quando alinhadas nas direções principais dos esforços podem elevar consideravelmente as resistências à tração e flexão do produto. Os compósitos reforçados com fibras podem ser subdivididos ainda nas quatro seguintes classes:

- Compósitos de fibras contínuas: Reforços longos e unidirecionais.
- Compósitos de fibras em tecido: Reforços longos e bidirecionais
- Compósitos de fibras descontínuas: Reforços curtos sem direções preferenciais.

- Compósitos híbridos: Mescla entre reforços longos direcionais e curtos não direcionais.

Tais materiais, em especial os de fibras contínuas, apresentam pronunciada anisotropia, que deve ser levada em conta na sua utilização. A Figura 13 ilustra essas quatro classes de compósitos.

Figura 13 – Tipos de compósitos reforçados com fibras. a) Fibras contínuas. b) Fibras em tecido. c) Fibras descontínuas. d) Híbridos.

Fonte: Adaptado de Gibson, (1994).

2.3.2 Compósitos reforçados com particulados

Nesse tipo de compósito as partículas são distribuídas em uma matriz, e tais particulados costumam ser em forma de flocos ou de pó. Asfalto, painéis de madeira aglomerada resinada e epóxis carregados com pós cerâmicos são exemplos dessa categoria de compósitos. A Figura 14-a ilustra compósitos com reforços em flocos, e a Figura 14-b com reforços pulverulentos.

Figura 14 – Tipos de compósitos reforçados com particulados. a) Particulado em flocos. b) Particulado em pó.

Fonte: Autor.

2.3.3 Compósitos como material de estruturas de máquinas

Tanto compósitos reforçados com particulados quanto com reforço de fibras são materiais utilizados na confecção de estruturas de vários tipos de máquinas.

Um exemplo de compósito, com reforço particulado, empregado como matéria prima de estruturas de máquina é o granito sintético. Esse material é aplicado em diversas classes de equipamentos de ultra precisão e máquinas operatrizes em geral. A combinação de matriz polimérica com reforço de particulado cerâmico, como enunciado por Piratelli e Levy, (2010), resulta em elevada absorção de vibração, estabilidade geométrica, e vantagens construtivas em relação a materiais metálicos tradicionalmente empregados na confecção de tais estruturas mecânicas, como aço carbono, ferro fundido e ligas de alumínio.

Compósitos reforçados com fibras longas são largamente empregados em estruturas de dispositivos mecânicos, em especial onde boa resistência e baixo peso são requeridos. Exemplos de tal uso são bicicletas com quadro com fibras de carbono e barcos de estrutura com fibras de vidro.

Em seu livro, Gibson (1994) apresenta exemplos nas indústrias aeronáutica e automotiva da utilização de materiais compósitos de fibras longas como elementos estruturais devido às boas propriedades mecânicas de tais materiais. Ashby (2005) traz alguns estudos de caso de seleção de material estrutural onde compara características dos compósitos com outros materiais estruturais tradicionais. Na Figura 15 se tem um exemplo de estrutura de dispositivo mecânico em fibra de carbono.

Figura 15 – Estrutura em fibra de carbono de um VANT.

Fonte: Diaz, (2016).

2.4 Elementos finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um meio extremamente eficiente no projeto e verificação na engenharia. Tal ferramenta é amplamente usada no estudo de tensões e deformações em componentes de forma variada e sob diferentes tipos de carregamentos, por

exemplo, estruturas de prédios, barragens, eixos e carcaças de máquina podem ser feitas utilizando *softwares* de elementos finitos (ALMEIDA, 2007; LIANG et al., 2013).

A prática do MEF é baseada na divisão do corpo a ser estudado, em um número finito de pequenos elementos, e na solução de um conjunto de equações que descrevem o comportamento de tensões normais e cisalhantes que atuam nas faces desses elementos. Tais esforços provocam deformações em cada elemento constitutivo e essas deformações podem ser modeladas por equações de tensão-deformação e lei de Hook, que são resolvidas numericamente (KLEBANOV; BARLAM; NYSTROM, 2008; WANG, 2014).

Uma simulação por elementos finitos com os *softwares* disponíveis no mercado, geralmente segue três passos: pré-processamento, processamento e pós-processamento (WANG, 2014).

- Pré-processamento:

Nessa etapa inicial, uma geometria, como ilustrado na Figura 16, correspondente ao corpo a ser ensaiado é desenhada no próprio programa de simulação por elementos finitos, ou importada de um *software* de CAD (*Computer Aided Design*).

Figura 16 – Geometria importada de software CAD.

Fonte: Autor.

Em seguida, é feito a geração da malha (conjunto) de elementos finitos, discretizando o corpo conforme exemplo da Figura 17. Tal etapa requer certa perícia de quem desempenha a tarefa para geração e refino da malha de acordo com o tipo de peça, características de forma e análise a ser executada posteriormente.

Figura 17 – Malha de elementos finitos.

Fonte: Autor.

Os carregamentos e restrições definidos nessa etapa de pré-processamento devem seguir satisfatoriamente as condições de trabalho da peça real. É necessário a informação de todas as fixações e esforços, bem como suas localizações na superfície do item quando em serviço, como exemplificado na Figura 18.

Figura 18 – Restrições e carregamentos.

Fonte: Autor.

Algumas propriedades do material da estrutura em estudo também são informações necessárias, e as propriedades importantes variam de acordo com o tipo de análise a ser feita. Propriedades como resistência à tração e compressão, módulo elástico, coeficiente de Poisson e módulo de cisalhamento são usualmente utilizados. Alguns *softwares* possuem amplo banco de dados de materiais e permitem ainda a edição de tais informações, inclusive se adequando a materiais anisotrópicos, compósitos e matérias-primas não usuais.

Outra possibilidade nos estudos empregando programas computacionais baseados em Método dos Elementos Finitos é considerar o corpo sob avaliação como constituído por dois ou mais tipos diferentes de materiais. Por exemplo, concretos formados por uma fase de cerâmica com determinadas propriedades e segunda fase em aço, com propriedades distintas da primeira, considerando que esses dois tipos de materiais não tem movimento relativo livre

entre eles (aderidos). Outro exemplo possível é a avaliação por MEF de corpos não densos fabricados por manufatura aditiva e preenchidos por material de reforço, alguns *softwares* de Elemento Finitos permitem estudos precisos considerando as diferentes propriedades mecânicas dos materiais constituintes da peça a ser avaliada.

Todas as atividades no pré-processamento são, em maior ou menor grau, dependentes do conhecimento e experiência do analista, bem como de práticas estatísticas e verificações de refino de modelo e malhas utilizados no estudo. Tais fatores influem fortemente na qualidade da modelagem e análises feitas e, por conseguinte, na confiabilidade do estudo como um todo.

- Processamento:

Essa etapa consiste no cômputo das tensões e deformações sofridas em todo o corpo em estudo. Embora seja por vezes considerada “invisível” ao usuário, é a etapa mais importante na resolução do problema, haja vista que nesse momento ocorrem todos os cálculos (ALMEIDA, 2007).

O método numérico de resolução depende do programa computacional de elementos finitos em uso, *softwares* mais sofisticados permitem a escolha do método e o refinamento de resultados (KLEBANOV; BARLAM; NYSTROM, 2008). O tempo de processamento é diretamente dependente da forma do corpo, malha e condições de contorno previamente definidas, bem como do programa de MEF e capacidade do computador utilizado para tal tarefa.

- Pós-processamento:

Nessa fase final, os resultados de tensões e deformações atuantes na estrutura toda, ou em regiões específicas, podem ser observados numericamente e graficamente. As opções de resultados possíveis variam com o programa e configurações em uso.

Por exemplo, na Figura 19 é observada a solução gráfica de deformação total (SHIGLEY; MISCHKE, 1996) de uma estrutura ensaiada, com locais de engaste e forças externas conforme Figura 18, apresentada anteriormente.

Figura 19 – Resultados de deslocamento.

Fonte: Autor.

Outras opções comuns de solução gráfica são as tensão e deformações máximas nas direções principais, valores em pontos específicos, Tensões de Von Mises e valores limites de tensão e deformação (ALMEIDA, 2007).

É importante considerar que estudos feitos em *softwares* distintos, com a mesma geometria e dados de entrada estabelecidos pelo usuário, podem gerar resultados diferentes, devido à estratégia e algoritmos aplicados por cada tipo de *software*. Nesse sentido o conhecimento técnico do usuário na avaliação dos resultados gerados no estudo é de grande importância.

As informações obtidas no pós-processamento são referencias para possíveis melhorias a serem feitas no projeto (pontos fracos) e facilitam a melhoria dos objetos analisados (WANG, 2014).

Atividades iterativas de avaliações baseadas em Método dos Elementos Finitos e modificações no projeto baseadas nos resultados obtidos por MEF constituem uma valiosa ferramenta de otimização do produto em análise.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse trabalho foram elaborados experimentos físicos e simulações para os quais se fabricou corpos de prova por manufatura aditiva tipo FDM, com diferentes orientações e densidades de impressão; também foi empregada resina epoxi e fibras de carbono visando o reforço mecânico das peças. Os corpos tiveram seus vazios preenchidos por resina e ensaiados. Igualmente, foram testados os materiais em separado, e os resultados dos ensaios são ainda dados para otimização da geometria interna por MEF. Com a geometria interna otimizada preenchida com compósito de resina e fibra de carbono, busca-se a majoração da resistência à tensões nas direções críticas do ensaio da peça.

3.1 Materiais

Neste trabalho foi selecionado e utilizado o material ABS P430 (acrilonitrila butadieno estireno, tipo P430), nas cores marfim e nectarina, tal matéria prima é fabricada pela empresa norte-americana Stratasys®. A máquina de manufatura aditiva por FDM utilizada foi do modelo Dimension Elite, da fabricante Stratasys®, equipamento escolhido por ter câmara de impressão e plataforma de impressão com temperaturas controladas, atuador de deposição de material de alta precisão (filamento depositado com 0,18 mm de diâmetro) e utilizar material suporte, o que proporciona maior precisão dimensional do produto. Essa impressora deposita filamentos de material sempre perpendicular aos filamentos da camada anterior, não sendo possível modificar esse parâmetro, a administração das direções de deposição de material em relação às direções da peça é realizada pelo posicionamento do corpo no volume de impressão. A Figura 20 apresenta a impressora 3D empregada para o presente trabalho.

Figura 20 – Impressora Dimension Elite da fabricante Stratasys®.

Fonte: Autor.

A resina utilizada adicionada aos corpos fabricados por impressão 3D foi a resina epoxi LY 5052 da marca Araldite®, lote AAE0749800. Tal resina tem cura a frio (em temperatura ambiente), baixa viscosidade inicial (650 mPa.s) e considerável *potlife*, superior a 45 min em temperatura ambiente, (tempo útil para trabalho após a mistura dos reagentes constituintes do material). O catálogo do fabricante também apresenta elevadas propriedades mecânicas para tal polímero epoxi sem adição de cargas, atingindo resistência superior a 75 MPa sob tração. Para reforço dessa resina epoxi foram aplicadas fibras de carbono Torayca T300 com diâmetro de $8 \pm 0,5 \mu\text{m}$ e densidade de $1,7 \text{ g/cm}^3$, comercializada na forma de feixe em carretel pelo Grupo Toray.

Para os processos remoção de ar das peças e infiltração foi empregada bomba de vácuo de bancada da fabricante Pfeiffer com capacidade de gerar 1×10^{-4} Torr.

Nos testes de resistência mecânica realizados foi utilizada uma máquina universal modelo Bionix marca MTS®, com célula de carga de 15 kN e *software* também da empresa MTS®, aparato de ensaio adequado às cargas e precisão necessária para o tipo de material em estudo. Os testes de tração foram feitos com auxílio de extensômetro mecânico de precisão com 25 mm de abertura inicial, e os testes de flexão empregaram um dispositivo de flexão a três pontos com espaçamento entre apoios (*span*) de 40 mm. Uma foto do dispositivo de flexão utilizado é mostrado na Figura 21.

Figura 21 – Dispositivo de flexão a três pontos.

Fonte: Autor.

Os desenhos dos corpos em CAD e conversão para formato de impressão (STL) foram executados com o *software* SolidWorks 2014 da empresa Dassault Systemes®. Análises pelo método dos elementos finitos empregaram o pacote ANSYS®, na versão 16.2.

3.2 Métodos

As atividades realizadas seguiram etapas de projeto dos corpos de prova, fabricação e caracterização de propriedades mecânicas dos materiais usados, (separadamente e em composições), a fim de se explorar e verificar a composição de material impresso em 3D estruturado internamente com resina e reforço, e ainda, otimizar tal estruturação interna empregando o Método dos Elementos Finitos. Um esquema da sequência de atividades é apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Fluxograma das atividades práticas.

Fonte: Autor.

3.2.1 Caracterização do ABS

Inicialmente foram medidas as resistências à tração, flexão e compressão do polímero ABS P430 prototipado, seguindo três diferentes configurações usuais de deposição de material na impressão 3D por FDM. Foram confeccionados corpos de prova com deposição de filamento a $[90^\circ]$, $[45^\circ/-45^\circ]$ e $[0^\circ/90^\circ]$ em relação à direção de carregamento nos ensaios de resistência mecânica, conforme ilustrado na Figura 23.

Figura 23 - Direções de deposição de filamento em FDM. a) $[90^\circ]$. b) $[45^\circ/-45^\circ]$. c) $[0^\circ/90^\circ]$.

Fonte: Adaptado de Ahn et al., (2002).

As geometrias dos corpos de prova foram baseadas nas normas ASTM D638 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2003), ASTM C393 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2009) e ASTM D695 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2010), respectivamente para os ensaios de tração, flexão e compressão. A Figura 24 ilustra o dimensional do corpo para ensaio trativo, bem como a Figura 25 para o ensaio de flexão e Figura 26 para o teste compressivo.

Figura 24 – Dimensões em milímetro do corpo de prova de tração ASTM D638 – tipo IV.

Fonte: Adaptado de American Society for Testing and Materials, (2003).

Figura 25 – Dimensões em milímetro do corpo de prova de flexão ASTM C393.

Fonte: Adaptado de American Society for Testing and Materials, (2009).

Figura 26 – Dimensões em milímetro do corpo de prova de compressão ASTM D695.

Fonte: Adaptado de American Society for Testing and Materials, (2010).

Todos os corpos foram fabricados com filamento de deposição com 0,18 mm de espessura e no modo de maior densidade dentre as configurações possíveis para a impressora 3D, condição que ainda resultou em 5% de porosidade nas peças testadas, tal porosidade foi medida por método baseado no princípio de Arquimedes. Utilizou-se material nas cores marfim e nectarina, também foi empregado material de suporte para maior precisão geométrica na confecção das peças.

Para comparação com resultados dos testes trativos das peças impressas, foram preparadas amostras dos fios de matéria prima *in natura* com 50 mm de comprimento e 1,8 mm de espessura, (espessura de comercialização do fio de ABS P430). As amostras foram retiradas dos mesmos cartuchos de matéria prima aplicada para os corpos impressos.

As velocidades de deformação total determinadas para os ensaios, baseado em informações das normas técnicas, foram de 1,0 mm/min para tração, de 0,5 mm/min para compressão, e de 0,75 mm/min para flexão. A taxa de aquisição de dados foi de 5 Hz durante os ensaios. Foram ensaiados cinco corpos de prova para cada configuração de deposição de filamento, à $[90^\circ]$, $[45^\circ/-45^\circ]$ e $[0^\circ/90^\circ]$ em relação às direções de aplicação dos esforços. A temperatura de 27°C e umidade relativa do ar em 55% foram constantes durante o procedimento.

Também foram observadas em microscópio as superfícies de fratura das peças fabricadas por FDM, ensaiadas em tração, a fim de se analisar a dinâmica da fratura em tal material.

3.2.2 Caracterização da resina epoxi

A fim de medir os limites de tensão da resina epoxi LY 5052 sob tração, flexão e compressão, respectivamente de acordo com as normas D638, C393 e D695 da ASTM, foram preparados corpos de prova desse material. As dimensões dos corpos para ensaios da resina foram as mesmas adotadas previamente na caracterização do ABS.

A preparação dos itens em resina, seguindo as indicações do catálogo do fabricante, foi realizada misturando-se a resina precisamente com a proporção adequada de endurecedor, mistura vigorosa até homogeneização, aplicação de vácuo até parar a borbulha. Depois o material foi colocado em moldes de silicone, já com as geometrias finais dos corpos de prova, em seguida posto em estufa por 16 horas a 50°C para cura.

As velocidades de teste foram de 1,0 mm/min para tração, 0,5 mm/min em compressão, e de 0,75 mm/min para flexão. A taxa de aquisição de dados durante os ensaios foi de 5 Hz e a temperatura ambiente se manteve em torno de 24°C e umidade relativa em 60%.

3.2.3 ABS infiltrado com resina – Sem geometria interna projetada

Com objetivo de analisar o efeito da simples infiltração de resina em relação às resistências à tração e flexão, (importantes propriedades em estruturas de máquinas), foram confeccionados corpos de prova por FDM. Os itens para tração foram fabricados na configuração de maior densidade e os corpos para flexão foram confeccionados em três configurações de densidade possíveis com a impressora 3D Dimension Elite, (denso, média densidade e baixa densidade). As geometrias internas aleatórias resultantes das trajetórias de deposição de material foram definidas pelo programa computacional da máquina de manufatura aditiva.

Escolheu-se fabricar os corpos impressos todos na configuração de deposição de material à $[0^\circ/90^\circ]$ em relação às solicitações, pois tal configuração se mostrou mais resistente como será discutido na seção 4.1.1.

Com as configurações de densidade aplicadas foram feitos corpos de prova de tração e flexão, baseados respectivamente nas normas D638 e C393 da ASTM, e com as mesmas dimensões utilizadas previamente para os ensaios com resina e ABS puros. As densidades dos itens fabricados foram medidas baseado no princípio de Arquimedes. A Tabela 1 apresenta as densidades dos corpos fabricados nessa etapa com as respectivas densidades.

Tabela 1 – Corpos de prova para infiltração com resina

Tipo de ensaio	Configuração de fabricação	Densidade medida
Tração	Denso	95%
Flexão	Denso	95%
Flexão	Média densidade	69%
Flexão	Baixa densidade	30%

Fonte: Autor

Os corpos de prova foram infiltrados com resina com auxílio da bomba de vácuo, até o preenchimento dos vazios de impressão pela resina epoxi LY 5052. Então as peças foram acondicionadas em moldes para que a resina não escoasse, mantendo o adequado

preenchimento dos corpos, e em seguida colocou-se o material na estufa por 16 horas a 50°C para cura.

O ensaio de tração utilizou velocidade de teste de 1,0 mm/min, e em flexão 0,75 mm/min, ficando a umidade relativa em 60% e temperatura a 24°C.

3.2.4 ABS infiltrado com resina – Com geometria interna projetada

Foram elaborados corpos de prova de flexão com estrutura celular interna projetada, a ser preenchida com resina, com a finalidade de se avaliar o ganho de resistência mecânica em relação às peças impressas sem infiltração de resina e com infiltração de resina sem geometria interna projetada. Os corpos para teste foram produzidos por FDM na configuração de deposição de material à $[0^\circ/90^\circ]$ em relação às solicitações, no modo de maior densidade de fabricação, seguindo a norma ASTM C393. A porcentagem de vazio medida desse corpo de prova impresso ficou em 50%. Na Figura 27 é apresentado o desenho em CAD do corpo de prova de flexão com uma estrutura celular interna (Estrutura 1).

Figura 27 – Corpo de prova de flexão com geometria interna projetada: Estrutura 1.

Fonte: Autor.

Foi infiltrado resina LY 5052, sob vácuo, até o preenchimento dos espaços vazios da peça, então as peças foram acondicionadas em moldes para impedir perda de resina, em seguida o material foi posto para curar a 50°C por 16 horas.

A velocidade de teste empregada nesse ensaio de flexão foi de 0,75 mm/min, permanecendo a umidade relativa e temperatura ambiente, respectivamente, em 62% e 25°C.

3.2.5 Resina com fibra de carbono

A fim de testar o limite de resistência à flexão, foram preparados corpos de prova de resina epoxi LY 5052 reforçada com fibras descontínuas de carbono. Para tanto foram

cortadas fibras de carbono no comprimento de 1 mm, dispersas em álcool isopropílico sob ultrassom e posteriormente secas para se ter uma adequada separação dos filamentos, em seguida o material de reforço foi misturado à resina na proporção de 1,5% em volume. O compósito foi colocado nos moldes com geometria baseada na norma C393 da ASTM, posto sob vácuo para retirada de bolhas, e em seguida colocado em estufa para cura a 50°C por 16 horas.

Com a umidade relativa do ar a aproximadamente 50% e temperatura na casa dos 23°C, foi realizado ensaio de flexão desse compósito com velocidade de teste de 0,75 mm/min.

3.2.6 ABS com estrutura interna preenchida com compósito

Foram elaborados corpos de prova de flexão com estrutura celular interna projetada, com mesmo desenho da Estrutura 1 da Figura 27, tais corpos foram preenchidos com resina reforçada com 1,5% em volume de fibras de carbono de 1 mm de comprimento, com a finalidade de se avaliar o ganho de resistência mecânica em relação às peças de mesma geometria interna infiltradas com resina sem reforço.

As fibras de carbono já cortadas no comprimento de 1 mm foram misturadas à resina LY 5052 com auxílio de um misturador (*mixer*), porém com pás maleáveis (em silicone) e com baixa rotação para evitar a quebra das fibras de no processo de mistura. Os corpos para teste foram produzidos por FDM na configuração de deposição de material à [0°/90°] em relação às solicitações, no modo de maior densidade de fabricação, seguindo a norma ASTM C393, e porcentagem de vazio de 50%. A resina reforçada foi infiltrada nas peças até o preenchimento dos espaços vazios, então as peças foram acondicionadas em moldes para impedir perda de resina, em seguida o material foi posto para curar a 50°C por 16 horas.

Foi observado, porém, que durante o processo de infiltração as fibras não penetraram adequadamente na peça, se concentrando mais nas regiões superficiais e gerando regiões sem quantidade relevante de fibras de carbono no interior da peça.

A velocidade de teste empregada nesse ensaio de flexão foi de 0,75 mm/min, permanecendo a umidade relativa e temperatura ambiente, respectivamente, em 50% e 27°C.

Devido ao fato de a geometria interna utilizada não ter permitido a adequada entrada das fibras de reforço na peça durante a etapa de infiltração, decidiu-se por testar uma nova geometria, mais simplificada e com maior abertura para entrada da resina com as fibras.

Também optou-se por uma configuração que concentrasse mais material nas extremidades da peça com maior concentração de tensão durante os ensaios de flexão. Essa configuração foi denominada Estrutura 2, mostrada na figura 28.

Figura 28 – Corpo de prova de flexão com geometria interna projetada: Estrutura 2.

Fonte: Autor.

Corpos de prova projetados conforme a imagem da Figura 28 foram impressos por FDM, conforme norma ASTM C393, e porcentagem de vazio volumétrico de 50%. Foram infiltradas peças com resina pura e com resina reforçada com 1,5% em volume de fibras de carbono de 1 mm de comprimento e a cura feita por 16 horas a 50°C. A velocidade de teste utilizada em tal ensaio fletivo foi 0,75 mm/min, com a umidade relativa e temperatura ambiente, respectivamente, em 70% e 28°C.

3.2.7 Modelagem por elementos finitos e otimização

A fim de se obter uma geometria interna otimizada para resistência à flexão, conforme testes físicos realizados, foi empregado *software* de análise pelo Método Elementos Finitos do pacote ANSYS®, na versão 16.2.

Inicialmente nessa etapa, foram reunidas informações sobre propriedades da resina epoxi LY 5052 pura e do ABS P430 impresso com 5% de porosidade preenchido com a resina pura, tais dados foram obtidos dos ensaios realizados previamente. A Tabela 2 traz o resumo das propriedades utilizadas como dados de entrada para os ensaios de MEF.

Tabela 2 – Propriedades utilizadas para ensaios de MEF.

Propriedade	Resina epoxi LY 5052	ABS P430 impresso Infiltrado com 5% de resina
Densidade (g/cm ³)	1,12	1,04
Módulo elástico direção X (GPa)	3,3	2,5
Módulo elástico direção Y (GPa)	3,3	2,5
Módulo elástico direção Z (GPa)	3,3	2,3
Coefficiente de Poisson XY	0,35	0,37
Coefficiente de Poisson YZ	0,35	0,38
Coefficiente de Poisson XZ	0,35	0,38
Tensão de escoamento tração direção X (MPa)	78	34
Tensão de escoamento tração direção Y (MPa)	78	34
Tensão de escoamento tração direção Z (MPa)	78	25
Tensão de escoamento compressão X (MPa)	99	47
Tensão de escoamento compressão direção Y (MPa)	99	47
Tensão de escoamento compressão direção Z (MPa)	99	40

Fonte: Autor.

Os desenhos dos corpos de prova de flexão em ABS com 50% de vazio interno para preenchimento em resina foram criados com o *software* SolidWorks 2014 e importadas para o *software* de Elementos Finitos.

No programa de EF, foram adotadas as propriedades do ABS infiltrado com 5% de resina para os volumes mais externos das peças (referentes aos volumes de material impresso), e foram adotadas as propriedades da resina epoxi pura para os volumes interiores (referentes aos vazios projetados no corpo impresso). As faces de contato entre os dois tipos de materiais foram consideradas fixadas uma na outra (coladas).

A Figura 29 ilustra a geometria de um corpo de prova de flexão, com o núcleo preenchido com resina e a região mais externa em ABS infiltrado com 5% de resina.

Figura 29 – Corpos de prova de flexão com núcleo em resina.

Fonte: Autor.

Tal configuração de corpo de prova utilizada para gerar um modelo em EF para ensaios virtuais, também foi usada essa configuração para fabricação de peças reais ensaiadas em flexão para comparações e validação do modelo virtual.

Para geração das malhas foram usados diferentes tipos de métodos disponíveis no software, buscando sempre elementos em formatos cúbicos e que as peças ficassem com mais de 350.000 elementos, pois tais condições se mostraram mais adequadas para convergência da malha e, por conseguinte, para a confiabilidade dos ensaios virtuais, nas condições de contorno empregadas. A Figura 30 mostra uma malha utilizada para ensaio.

Figura 30 – Malha para ensaio EF. a) Corpo de prova inteiro. b) Detalhe canto inferior.

Fonte: Autor.

Para as simulações de ensaio de flexão a três pontos por MEF foi considerado aplicação de força igualmente distribuída em uma área de 13 mm^2 no centro da superfície superior da peça e os dois apoios sem atrito com área de contato de 13 mm^2 cada um com a superfície inferior da peça, com *span* de 40 mm.

Foram feitos ensaios virtuais de peças com composições testadas previamente em ensaios reais e a comparação do comportamento das peças virtuais e reais sob flexão serviu para ajustes nos modelos, garantindo a confiabilidade da modelagem e ensaios com o *software* de EF.

Foram realizadas várias iterações para otimização da geometria interna, de modo que a peça ficasse o mais resistente e rígida à flexão, mantendo-se 50% do volume em ABS e uma espessura mínima de 0,5 mm de parede externa, assegurando manutenção da geometria externa dos corpos. Nas etapas de otimização se buscou adicionar material de reforço nas áreas de maiores solicitações e levando-se em consideração as resistências à tração e compressão tanto do ABS quanto da resina.

Após as etapas iterativas, chegou-se a uma geometria interna otimizada para as condições requeridas e foram confeccionadas peças seguindo tal desenho interno otimizado. Tais peças reais foram preenchidas com a resina epoxi, deixadas em estufa por 16 horas a 50°C e realizados ensaios de flexão com velocidade de 0,75 mm/min, a 25°C.

3.2.8 ABS com estrutura interna otimizada preenchida com compósito

Peças com a geometria interna otimizada para o ensaio de flexão foram impressas na configuração de deposição de material à $[0^\circ/90^\circ]$, e preenchidas com resina reforçada com fibras de carbono. Foi utilizado fibras curtas de carbono (1 mm), de modo que o corpo de prova final ficasse com 1 % em volume de fibras.

Para comparações, também foram preparados corpos de prova com fibras de carbono longas, com aproximadamente 50 mm, e também foram feitos corpos com fibras em tecido. Sempre se mantendo 1% de reforço de carbono no volume final do corpo para ensaio de flexão. Tanto para os corpos com fibras curtas quanto em tecido, o material foi colocado manualmente através da abertura em uma das faces do corpo de prova e a resina foi infiltrada posteriormente sob vácuo, completando os vazios das peças.

Após infiltração com resina epoxi os corpos de prova foram acondicionados em estufa por 16 horas a 50°C para a cura da resina. Os ensaios de flexão empregaram velocidade de 0,75 mm/min, a 25°C e umidade relativa do ambiente em 60%.

3.2.9 Estrutura mecânica para validação do conceito de projeto estudado

Para validar a técnica em foco no presente trabalho, foi projetada a estrutura de um *drone*, a fim de se realizar simulação de uma condição crítica de serviço de tal componente, por MEF, e assim reforçar as regiões de maior solicitação da estrutura. O desenho inicial da estrutura proposta para essa etapa do trabalho é mostrado na Figura 31.

Figura 31 – Desenho inicial *drone*.

Fonte: Autor.

Um modelo referente à estrutura proposta foi feito e simulado no *software* de Elementos Finitos. Para tal simulação foi considerada uma situação de trabalho do *drone* em que o movimento de cada um dos quatro motores resulta em um empuxo de 100 N aplicado em cada furo de alojamento desses motores. Ainda, foi considerada a parte central da estrutura como fixa em relação ao solo. A Figura 32 exemplifica tais condições de simulação empregadas.

Figura 32 – Restrições e carregamentos para ensaio por EF.

Fonte: Autor.

Baseado nos resultados obtidos da simulação por EF da condição crítica de trabalho do dispositivo, foi proposto um reforço nas áreas de maior solicitação mecânica da estrutura do *drone*.

Foram projetados canais, a serem preenchidos com fibras de carbono longas e resina epoxi, para reforçar as regiões dos vértices dos braços do *drone*. A região do vértice inferior

dos braços da estrutura sofre considerável esforço de tração na condição de trabalho testada virtualmente. Os outros vértices também são regiões críticas para situações em geral de trabalho do dispositivo, como movimentos abruptos de subida e descida, bem como manobras para mudança de direção (*yaw*, *pitch* e *roll*). A Figura 33 mostra em (a) a estrutura com os furos para alocação do compósito de reforço, em (b) o detalhe dos furos que passam por um dos braços da estrutura.

Figura 33 – Estrutura com furos para adição de material de reforço. a) Estrutura completa. b) Detalhe dos furos no braço.

Fonte: Autor.

Foram fabricadas cinco peças por manufatura aditiva tipo FDM, conforme desenho mostrado na Figura 33, com ABS P430, filamento depositado de 0,18 mm e alta densidade.

Foram adicionadas fibras longas de carbono aos furos, de modo que o comprimento das fibras preencheu todo o comprimento dos furos, em seguida as estruturas foram completamente infiltradas com resina epoxi. Após adição das fibras e infiltração da resina, as peças foram embaladas a vácuo em sacos de polietileno para o não escoamento da resina epoxi, e permaneceram em estufa por 16 horas a 50°C para a cura. Desse modo, os locais dos furos dos braços da estrutura impressa se tornaram um reforço de compósito de resina e fibra de carbono, e as demais regiões da peça também foram reforçadas com a resina que se infiltrou nas porosidades do material impresso. Tal etapa do trabalho resultou em estruturas com 2% em volume de fibras de carbono, 16% de resina e 82% de ABS.

Pare testes comparativos com as estruturas reforçadas, foram fabricadas cinco peças por manufatura aditiva tipo FDM, com ABS P430, filamento depositado de 0,18 mm e alta densidade, com desenho equivalente ao mostrado na Figura 33, porém sem os furos para adição de compósito de reforço.

A fim de se comparar a rigidez e resistência dos dois tipos de estrutura de *drone* feitas, (reforçadas e não reforçadas), para uma condição crítica de trabalho, foi proposto um teste mecânico de flexão das estruturas. Para tal teste foi utilizado um dispositivo de modo que as regiões de fixação dos quatro motores do *drone* ficassem apoiadas e um punção de 11 mm de diâmetro aplicasse uma carga progressiva na região central da estrutura. A Figura 34 apresenta uma peça testada com o dispositivo de ensaio.

Figura 34 – Ensaio físico *drone*.

Fonte: Autor.

Por fim, foi montado o aparato com placas, motores, hélices, fios e bateria na estrutura reforçada com resina e fibras de carbono. Os componentes eletrônicos utilizados foram de um modelo comercial e com dimensões próximas da estrutura fabricada nessa etapa do trabalho, com propósito de se realizar testes posteriores do funcionamento do *drone* em voo, com a estrutura fabricada por manufatura aditiva e reforçada internamente com compósito.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização dos materiais

4.1.1 Caracterização do ABS

Nos ensaios dos corpos de prova impressos em 3D com ABS P430, verificou-se forte anisotropia, inerente ao processo de manufatura aditiva por camadas. Corpos de prova com deposição de filamento na direção $[0^\circ/90^\circ]$ se provaram mais resistentes e mais rígidos, dentre as configurações testadas, e os corpos com deposição de filamento na direção $[90^\circ]$ foram os menos resistentes e menos rígidos. Tal comportamento foi verificado em tração, flexão e compressão.

Nos resultados do teste trativo, apresentados na Figura 35 e na Tabela 3, observa-se pronunciada vantagem na resistência da configuração $[0^\circ/90^\circ]$.

Figura 35 – Resultados dos ensaios de tração das peças impressas.

Fonte: Adaptado de Lovo e Fortulan, (2016).

Tabela 3 – Resultados ensaio de tração do ABS impresso em 3D.

Direção de deposição	Módulo elástico (GPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão máxima (MPa)
[90°]	1,2	14 ± 2	15 ± 2
[45°/-45°]	1,5	24 ± 2	29 ± 1
[0°/90°]	1,6	30 ± 1	32 ± 2

Fonte: Autor.

A tensão máxima em tração do fio do ABS *in natura* ficou em 37±2 MPa e a tensão de escoamento em 34±1 MPa, valores cerca de 15% superiores aos obtidos nas peças impressas na configuração mais resistente.

Nas análises em microscópio das superfícies de fratura das peças fabricadas por FDM e ensaiadas em tração, foi possível observar que a fratura ocorre no sentido de descolar as camadas de impressão. A Figura 36 apresenta a vista lateral de parte da superfície de falha de um corpo de prova com filamentos depositados na direção [45°/-45°]. É observado que a fratura ocorre seguindo as direções de deposição das camadas.

Figura 36 – Vista lateral da superfície de fratura corpo de prova [45°/-45°].

Fonte: Autor.

Os resultados dos testes de flexão dos corpos de prova, nas três diferentes configurações de deposição de filamento por FDM e na maior densidade de impressão 3D, estão resumidos na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados ensaio de flexão do ABS impresso em 3D.

Direção de deposição	Tensão máxima sob flexão (MPa)
[90°]	20 ± 3
[45°/-45°]	52 ± 1
[0°/90°]	53 ± 1

Fonte: Autor.

Os ensaios de compressão, a exemplo dos testes trativos e de flexão, evidenciaram a característica anisotrópica dos corpos confeccionados por FDM. Os resultados de resistência à compressão dos corpos densos, nas três configurações de deposição de filamento, apresentam-se na Figura 37 e na Tabela 5.

Figura 37 – Resultados dos ensaios de compressão das peças impressas.

Fonte: Adaptado de Lovo e Fortulan, (2016).

Tabela 5 – Resultados ensaio de compressão do ABS impresso em 3D.

Direção de deposição	Tensão de escoamento compressão (MPa)	Tensão máxima compressão (MPa)
[90°]	36 ± 1	42 ± 2
[45°/-45°]	39 ± 2	45 ± 1
[0°/90°]	43 ± 1	49 ± 2

Fonte: Autor.

Os resultados dos ensaios realizados mostram que a resistência mecânica de peças impressas por FDM com ABS P430, sem reforço, ainda fica aquém da resistência de corpos fabricados por outros métodos com diferentes polímeros.

4.1.2 Caracterização da resina epoxi

Os resultados dos ensaios de tração, flexão e compressão de corpos de prova em resina epoxi, empregada no presente trabalho, confeccionados com auxílio de moldes,

demonstraram boa resistência mecânica do material, interessante para aplicação desejada. A Tabela 6 apresenta os números obtidos nos testes mecânicos desse material.

Tabela 6 – Resultados ensaios resina LY 5052.

Material	Módulo elástico (GPa)	Tensão máxima tração (MPa)	Tensão máxima flexão (MPa)	Tensão máxima compressão (MPa)
Resina epoxi	3,3	79 ± 2	133 ± 5	102 ± 5

Fonte: Autor.

Além das boas propriedades mecânicas, o material apresentou baixa viscosidade por um bom período após mistura do endurecedor, adequado para os processos de infiltração das etapas subsequentes do trabalho.

4.1.3 ABS infiltrado com resina – Sem geometria interna projetada

Os resultados dos ensaios de tração e flexão, dos corpos de prova fabricados com deposição de filamento à $[0^\circ/90^\circ]$, com diferentes densidades de impressão, e ainda infiltrados com a resina epoxi até total preenchimento da porosidade, foram calculados e estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados ABS infiltração com resina – Sem geometria interna projetada.

Tipo de ensaio	Configuração de impressão	Densidade de impressão	Proporção em volume de resina na peça	Tensão máxima (MPa)
Tração	Denso	95%	5%	36 ± 2
Flexão	Denso	95%	5%	57 ± 1
Flexão	Média densidade	69%	31%	57 ± 3
Flexão	Baixa densidade	30%	70%	60 ± 1

Fonte: Autor.

Os corpos de prova, impressos densos com adição de 5% em volume de resina, para tração e flexão, tiveram ganhos de 12,5% e 7% respectivamente em relação às resistências dos corpos impressos densos sem material de reforço, como se infere da comparação entre a Tabelas 7, Tabela 4 e a Tabela 3.

Nota-se ainda que os corpos testados em flexão, impressos com média e baixa densidade e preenchidos com resina, não apresentaram resistência à flexão proporcional à quantidade de resina adicionada à peça. Tal efeito ocorreu, pois a geometria interna gerada pelo *software* da impressora 3D acarreta regiões com baixa concentração de material de

reforço ao longo da seção longitudinal do corpo de prova, e nessas regiões ocorre a falha prematura da peça.

4.1.4 ABS infiltrado com resina – Com geometria interna projetada

No ensaio com corpos de prova de geometria interna projetada (como na Figura 27), a resistência à flexão se provou maior que nos corpos sem geometria interna projetada. A Tabela 8 apresenta a tensão máxima de flexão no referido ensaio.

Tabela 8 – Resultados ABS infiltração com resina – Com geometria interna projetada.

Tipo de ensaio	Geometria interna projetada	Proporção em volume de ABS na peça	Proporção em volume de resina na peça	Tensão máxima flexão (MPa)
Flexão	Estrutura 1	50%	50%	62 ± 3

Fonte: Autor.

Comparando os valores da Tabela 8 e Tabela 7, observa-se que os corpos de desenho interno projetado e com 50% em volume de resina, resistiram mais à flexão (62 MPa) que os corpos com configuração interna aleatória (60 MPa), mesmo esses tendo 70% do volume em resina. Contudo, se percebe que uma geometria interna melhorada resultaria em resistência à flexão do corpo ainda maior.

4.1.5 Caracterização da resina com fibra de carbono

A adição de fibra de carbono à resina, em comprimentos de 1 mm, se mostrou efetiva no incremento da resistência à flexão do material. A Tabela 9 apresenta o resultado do ensaio de flexão da resina com reforço.

Tabela 9 – Resultados ensaio resina epoxi reforçada com fibras de carbono.

Tipo de ensaio	Proporção em volume de fibras de carbono	Tensão máxima flexão (MPa)
Flexão	1,5%	145 ± 1

Fonte: Autor.

Tal resultado mostra um ganho em torno de 9% na resistência à flexão da resina epoxi utilizada no presente trabalho, quando reforçada com 1,5% em volume de fibras curtas de carbono como empregadas.

4.1.6 ABS composto com resina e fibra de carbono

Os dois tipos diferentes de estruturação interna dos corpos de prova testados nessa etapa do trabalho, (supracitados como Estrutura 1 e Estrutura 2), apresentaram considerável diferença na resistência à flexão, como observado a seguir, na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados ABS infiltração com resina reforçada com fibras curtas – Com geometria interna projetada.

Configuração	Proporção em volume de ABS na peça	Proporção em volume de resina na peça	Proporção em volume de fibras na peça	Tensão máxima flexão (MPa)
Estrutura 1	50%	49%	1%	64 ± 5
Estrutura 2	50%	49%	1%	95 ± 4

Fonte: Autor.

Nos corpos de prova referentes à Estrutura 1 houve pouco significativo na resistência à flexão com a adição de fibras à resina, em relação à mesma estruturação interna preenchida somente com resina, pois tais fibras não penetraram satisfatoriamente junto com a resina na geometria interna da peça, gerando regiões praticamente sem reforço de carbono.

Já os corpos referentes à Estrutura 2 apresentaram ganhos significativos na resistência à flexão em relação à Estrutura 1, tanto por ter maior quantidade de material de reforço nas extremidades da secção transversal da peça (região de maiores tensões de tração e compressão), quanto por proporcionar uma maior homogeneidade na distribuição das fibras de carbono no interior dos corpos de prova.

4.1.7 Modelagem e otimização por EF

Após etapas iniciais de verificação de correspondência do comportamento mecânico entre os modelos e peças reais previamente ensaiadas no presente trabalho, foram realizadas várias iterações de modelagem e simulação por EF do ensaio de flexão a três pontos, buscando otimizar a geometria interna em prol da resistência à flexão e rigidez da peça, nas condições definidas. Como resultado desse processo, desenhou-se uma geometria interna otimizada do corpo de prova conforme ilustrado na Figura 38.

Figura 38 - Corpo de prova de flexão com geometria interna otimizada.

Fonte: Autor.

Tal geometria otimizada concentra material de reforço principalmente na região inferior do corpo de prova, onde é maior a tensão trativa, tensão essa crucial para a falha da peça no teste de flexão. A geometria também garantiu economia de material de reforço nas regiões de menores esforços, como nas proximidades da linha neutra e áreas externas ao *span*.

Os resultados de deformação total e tensões equivalentes (Von-Misses) dos corpos de prova modelados com a geometria interna otimizada, com a aplicação de uma força de 2 kN na face superior, estão apresentados nas imagens das Figuras 39 e 40.

Figura 39 – Deformação total.

Fonte: Autor.

Figura 40 - Tensões equivalentes de Von-Misses.

Fonte: Autor.

O modelo com a configuração interna otimizada apresentou deformação consideravelmente menor que modelos com outras geometrias internas testadas submetidas a mesma força e menores tensões na superfície inferior da peça, características importantes na avaliação da rigidez e resistência do corpo de prova sob flexão.

Para efeito de comparação, peças reais com a mesma geometria interna preenchidas com resina foram testadas, e foi verificado excelente correspondência entre o comportamento das peças, sendo a diferença entra as deformações reais e virtuais sempre menores que 6% para força de até 2,3 kN nos ensaios de flexão.

As peças reais com geometria interna otimizada por EF preenchidas com resina epoxi pura foram ensaiadas e os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultados ABS infiltração com resina – Com geometria interna otimizada.

Configuração	Proporção em volume de ABS na peça	Proporção em volume de resina na peça	Tensão máxima flexão (MPa)
Otimizada por EF	50%	50%	101 ± 3

Fonte: Autor.

A grande resistência à flexão de tais corpos de prova se deve em especial à grande camada de material de reforço na superfície inferior da peça (região de maiores esforços trativos) e concentração de resina nas áreas de maior necessidade de resistência mecânica em geral. A imagem da Figura 41 mostra o canto inferior da superfície de fratura de um corpo de prova na configuração otimizada preenchido com resina, na imagem é possível observar a região de início da trinca que se propagou e levou à ruptura da peça ensaiada.

Figura 41 – Detalhe da superfície de fratura da peça otimizada reforçada com resina.

Fonte: Autor.

4.1.8 ABS com estrutura interna otimizada preenchida com compósito

Os corpos de prova com estrutura interna otimizada para o ensaio de flexão, preenchidos com resina e fibras de carbono em tecido e em fibras longas apresentaram ligeiro ganho de resistência à flexão em relação à mesma configuração interna de peça preenchida somente com resina, porém os corpos que utilizaram reforço de fibras curtas praticamente não apresentaram aumento na resistência. A Tabela 12 apresenta o resumo dos resultados obtidos em tal etapa do trabalho.

Tabela 12 - Resultados ABS infiltração com resina e fibras de carbono – Com geometria interna otimizada.

Configuração	Proporção em volume de ABS na peça	Proporção em volume de resina na peça	Proporção em volume de fibras na peça	Tensão máxima flexão (MPa)
Otimizada com fibras curtas	50%	49%	1%	103 ± 3
Otimizada com fibras longas	50%	49%	1%	112 ± 4
Otimizada com fibras em tecido	50%	50%	1%	111 ± 4

Fonte: Autor.

As peças que empregaram resina com reforço de fibras de carbono curtas apresentaram segregação das fibras, gerando regiões dos corpos de prova preenchidas com resina praticamente pura, propícias para início da falha. Por esse motivo não houve ganho

significativo na resistência à flexão das peças preenchidas com resina reforçadas com fibras curtas, em relação as peças preenchidas com resina pura.

Os corpos de prova preenchidos com resina e reforçados, com fibras de carbono longas e fibras de carbono arranjadas em tecido, apresentaram ganho na resistência à flexão que justifica o uso do reforço em carbono, e tais resultados inspiram testes futuros com maior porcentagem de fibras longas adicionadas aos corpos.

A imagem da Figura 42 mostra o canto inferior da superfície de fratura de um corpo de prova na configuração otimizada preenchido com resina e fibras curtas de carbono. Em tal imagem é possível perceber a segregação das fibras, o que gerou uma região com mais reforço (mais escura) e uma região com menos reforço (mais clara), ainda é possível ver o local de início da trinca na interface dessas duas regiões mais clara e mais escura, no nível da superfície inferior da peça.

Figura 42 – Detalhe da superfície de fratura da peça otimizada reforçada com resina e fibras curtas de carbono.

Fonte: Autor.

Na Figura 43 é visto a região inferior da superfície de fratura de um corpo de prova na configuração otimizada preenchido com resina e fibras longas de carbono. Em tal imagem é possível perceber um vazio bem próximo ao limite da região do compósito, em tal defeito possivelmente se iniciou a trinca catastrófica durante o ensaio.

Figura 43 – Detalhe da superfície de fratura da peça otimizada reforçada com resina e fibras curtas de carbono.

Fonte: Autor.

A superfície de fratura de um corpo de prova na configuração otimizada preenchido com resina e fibras de carbono em tecido é observada na Figura 44. Também nessa região da superfície de fratura são observadas marcas de não homogeneidade (bolhas) no compósito que contribuíram para falha do material em tal região do corpo de prova em teste.

Figura 44 – Detalhe da superfície de fratura da peça otimizada reforçada com resina e fibras curtas de carbono.

Fonte: Autor.

4.1.9 Estrutura mecânica para validação do conceito de projeto

A simulação da condição crítica de serviço, empregando MEF, da estrutura do *drone* evidenciou considerável esforço de tração, e consequentemente deformação total, nas superfícies inferiores dos braços do componente estrutural. Na imagem da Figura 45 se observa as regiões de maiores esforços trativos gerados na estrutura, para a condição ensaiada.

Figura 45 – Deformação total da estrutura do drone por MEF.

Fonte: Autor.

Dos resultados dos testes realizados para comparar rigidez e resistência das estruturas com e sem reforço, foi gerado o gráfico apresentado na Figura 46. Em tal gráfico é possível observar que, para a situação testada, apesar da menor capacidade de deformação plástica, a estrutura com reforço de compósito resistiu a mais que o dobro da carga máxima suportada pela estrutura não reforçada, além de se provar consideravelmente mais rígida.

Figura 46 – Comparativo rigidez e resistência das estruturas do *drone*.

Fonte: Autor.

A montagem dos componentes do *drone* com a estrutura projetada e reforçada com compósito de resina epoxi e fibra de carbono, resultou em um produto final como apresentado na imagem da Figura 47. Tal montagem auxilia na validação do conceito proposto no presente

projeto e serviu de verificação da capacidade de montagem dos componente, após etapa de infiltração da estrutura projetada e reforçada.

Figura 47 – *Drone com estrutura reforçada com compósito.*

Fonte: Autor.

5 CONCLUSÕES

Dos testes e resultados obtidos nas etapas iniciais do trabalho, observa-se que a simples infiltração, sob vácuo, de resina nas peças fabricadas por manufatura aditiva tipo FDM em alta densidade, atenua o efeito de anisotropia, bem como promove considerável melhoria das propriedades mecânicas desse tipo de produto. Peças impressas em ABS com apenas 5% de porosidade, após infiltração com resina epoxi, atingiram resistência mecânica 8% maior que as peças com as mesmas configurações de impressão, sem infiltração de resina.

Verificou-se que os vazios internos projetados nas peças impressas em 3D, posteriormente preenchidos com resina de alta resistência mecânica, resultaram em uma estrutura interna de reforço para peça impressa, proporcionando apreciáveis ganhos de resistência mecânica, na casa dos 80%. O projeto de tais geometrias internas, preenchidas com material de reforço, pode ser feito de acordo com as solicitações mecânicas às quais a peça estará submetida quando em serviço.

Também se comprovou que a resina a ser infiltrada nas peças fabricadas por FDM pode ter suas propriedades ainda melhoradas, quando em composição com fibras de carbono, em especial fibras longas e em tecido.

Os resultados obtidos nos ensaios mecânicos com ABS impresso, da resina epoxi e de composição entre tais materiais serviram de dados para projeto e otimização de peças com enfoque em resistência à flexão, utilizando *softwares* de CAD e Elementos Finitos. Após etapas de otimização da geometria interna, com uso do Método dos Elementos Finitos, foram obtidos corpos de prova de flexão com 50% de ABS, 49% de resina e 1% de fibra de carbono em volume, e tais corpos atingiram resistência à flexão de 112 MPa, valor superior a 210% do suportado pelos corpos somente em ABS, mantendo a densidade da peça abaixo de 1,2 g/cm³, preservando a precisão dimensional externa do produto proporcionada pela máquina de manufatura aditiva.

Para validar a técnica em foco no presente trabalho, foi projetada a estrutura de um *drone* como estudo de caso, simulando uma condição crítica de serviço. Foram identificadas, por MEF, as regiões de maior solicitação da estrutura para a condição de carregamento testada, e o reforço de resina e compósito priorizou tais regiões. A estrutura impressa em ABS (82% em volume de ABS), com reforço de compósito, resistiu a mais que o dobro da carga máxima suportada pela estrutura não reforçada (100% ABS). A estrutura reforçada por compósito também se mostrou consideravelmente mais rígida.

Assim, os resultados obtidos nas diversas etapas realizadas nesse trabalho mostram a viabilidade da técnica apresentada usando estruturação interna, com compósitos, de peças fabricadas por manufatura aditiva. Os resultados demonstram também que tal técnica de projeto pode ser ainda mais efetiva quando a estruturação interna é feita de modo a priorizar áreas mais solicitadas mecanicamente, e tais regiões podem ser identificadas, por exemplo, com auxílio do MEF.

O projeto e fabricação de componentes mecânicos por manufatura aditiva e estruturação interna se mostra uma valiosa ferramenta para obtenção de peças, em especial componentes estruturais leves e de desenho rebuscado, por aliar a alta flexibilidade de geometria da impressão 3D e a alta resistência mecânica de materiais de reforço.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGGOGERI, F. et al. Vibration damping analysis of lightweight structures in machine tools. **Materials**, v. 10, n. 3, p. 297–312, 2017.

AHN, S. H. et al. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. **Rapid Prototyping Journal**, v. 8, n. 4, p. 248–257, 2002.

ALBANO, L. D.; SUH, N. P.; PECHT, M.; SLOCUM, A.; JAKIELA, M.; LEWIS, K.; MISTREE, F.; RAO, J. **Engineering Design. Mechanical Engineering Handbook**, Boca Raton: CRC Press, 109 p. 1999.

ALMEIDA, W. J. **Otimização estrutural de protótipos fabricados pela tecnologia FDM utilizando o método dos elementos finitos**. 2007. 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638-03**: Standard test method for tensile properties of plastics. West Conshohocken, p. 1-13, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D695-10**: Standard test method for compressive properties of rigid plastics. West Conshohocken, p. 1-7, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C393-09**: Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam. West Conshohocken, p. 1–8, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM F2792-13**: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. West Conshohocken, p. 10–12, 2013.

ASHBY, M. F. **Materials Selection in Mechanical Design**. Londres: Pragmon Press, 624 p. 2005.

ANDRE, J. C.; LE MEHAUTE, A.; DE WITTE, O. **Dispositif pour realiser un module de piece industrielle**, 1984. Disponível em: <<http://bases-brevets.inpi.fr/fr/document/FR2567668/publications.html>> Acesso em: 25 jun. 2016.

BASZYNSKI, M. et al. Evaluation of new technologies and materials for printed circuit boards with improved heat dissipation properties. **Circuit World**, v. 42, n. 1, p. 32–36, 2016.

CAO, S. et al. Experimental and theoretical investigation on ultra-thin powder layering in three dimensional printing (3DP) by a novel double-smoothing mechanism. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 220, p. 231–242, 2015.

CHANTARAPANICH, N. et al. Fabrication of three-dimensional honeycomb structure for aeronautical applications using selective laser melting: a preliminary investigation. **Rapid Prototyping Journal**, v. 20, n. 6, p. 551–558, 2014.

CHEN, J.; CHEN, Y.; WU, C.; TENG, Y. **Compression of honeycomb preform sandwich**

composites. Taiwan 2009.

CHRISTIYAN, K. G. J.; CHANDRASEKHAR, U.; VENKATESWARLU, K. A study on the influence of process parameters on the mechanical properties of 3D printed ABS composite. **Materials Science and Engineering**, v. 114, p. 1-9, 2016.

COMPTON, B. G.; LEWIS, J. A. 3D-printing of lightweight cellular composites. **Advanced Materials**, v. 26, n. 34, p. 5930–5935, 2014.

CORREA, D. M. et al. Negative stiffness honeycombs for recoverable shock isolation. **Rapid Prototyping Journal**, v. 21, n. 2, p. 193–200, 2015.

CRUMP, S. S. **Apparatus and method for creating three-dimensional objects**. US 005121329A, 30 Oct. 1989, 09 Jun. 1992.

CUNICO, M. M. **Desenvolvimento de nova tecnologia de manufatura aditiva baseado em formação seletiva de compósito**. 2013. 290 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

DIAZ, J. Best lightweight carbon fiber quadcopter racing drone frame. **Small Drone Reviews**. Disponível em: < <http://smalldronesreview.com/2016/05/02/best-lightweight-carbon-fiber-quadcopter-racing-drone-frame/>>. Acesso em: 01 mai. 2017.

EGUIA, J.; URIARTE, L.; LAMIKIZ, A. Analysis, optimization and accuracy assessment of special-purpose portable machines by virtual techniques. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. v. 111, n. 1, p. 31–42, 2016.

EYERS, R. D.; POTTER, T. A. E-commerce channels for additive manufacturing: an exploratory study. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v.26, n.3, p. 390–411, 2015.

FRANCESCHINI, J.; GOMES, H. M. Avaliação de amortecimento estrutural usando-se o método do “random decrement”. **Engenharia Estudo e Pesquisa**, v. 10, n. 1, p. 39-48, 2010.

GAO, W. et al. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. **Computer-Aided Design**, v. 69, n. 1, p. 65–89, 2015.

GIBSON, I.; ROSEN, D.; Stucker, B. **Additive Manufacturing Technologies**. 2. ed. New York: Springer Science, 2014.

GIBSON, R. F. **Principles of Composite Material Mechanics**. New York: McGraw-Hill, 1994.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

HULL, C. W. **Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography**. US 4575330, 08 Aug. 1984, 11 Mar. 1986.

KLEBANOV, B. M.; BARLAM, D. M.; NYSTROM, F. E. **Machine Elements Life and Design**. Boca Raton: CRC Press, 2008.

KODAMA, H. Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer. **Review of Scientific Instruments**, v. 52, n. 11, p. 1770–1773, 1981.

KOLESKY, D. B. et al. 3D bioprinting of vascularized, heterogeneous cell-laden tissue constructs. **Advanced Materials**, v. 26, n. 19, p. 3124–3130, 2014.

LABEAS, G.; PTOCHOS, E. Homogenization of selective laser melting cellular material for impact performance simulation. **International Journal of Structural Integrity**, v. 6, n. 4, p. 439–450, 2015.

LIANG, Y. et al. A mechanical structure-based design method and its implementation on a fly-cutting machine tool design. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 70, n. 9–12, p. 1915–1921, 2013.

LOVO, J. F. P.; et al. Synthetic granite composite for precision equipment structures. **Revista Matéria**. 2018. No prelo.

LOVO, J. F. P.; FORTULAN, C. A. **Estudo de propriedades mecânicas e anisotropia em peças fabricadas por manufatura aditiva tipo FDM**. São Carlos: 1 Simpósio de Pós Graduação em Engenharia Mecânica EESC-USP, 2016

LUCISANO, G.; STEFANOVIC, M.; FRAGASSA, C. Advanced design solutions for high-precision woodworking machines. **International Journal for Quality Research**, v. 10, n. 1, p. 143–158, 2016.

LUO, S.; HOANG, P. T.; LIU, T. Direct laser writing for creating porous graphitic structures and their use for flexible and highly sensitive sensor and sensor arrays. **Carbon**, v. 96, p. 522–531, 2015.

MALEKSAEEDI, S. et al. Property enhancement of 3D-printed alumina ceramics using vacuum infiltration. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 214, n. 7, p. 1301–1306, 2014.

MAO, D.; **Improving Mechanical Properties of Nanocomposites Using Carbon Nanotubes**. Austin: SAMPE, 2011.

MEHRABI, M. G.; ULSOY, A. G.; KOREN, Y. Reconfigurable manufacturing systems: key to future manufacturing. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 11, n. 4, p. 403–419, 2000.

MESSLER, R. W. **Joining of Materials and Structures: From Pragmatic Process to Enabling Technology**. Oxford: Elsevier, 2004.

MONZON, M. D. et al. Process for reinforcing SLS parts by epoxy resin. **Rapid Prototyping Journal**, v. 21, n. 3, p. 322–328, 2015.

MOON, S. K. et al. Application of 3D printing technology for designing light-weight unmanned aerial vehicle wing structures. **International Journal of Precision Engineering**

and Manufacturing-Green Technology, v. 1, n. 3, p. 223-228, 2014.

NETTO, J. M. J.; SILVEIRA, Z. DE C. **Método de avaliação de variantes de solução a uma impressora 3D portátil, baseada na tecnologia**. Itajubá: 10º Congresso Brasileiro de Inovação e Gestão de Desenvolvimento do Produto, 2015.

NING, F. et al. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. **Composites Part B**, v. 80, n. 1, p. 369–378, 2015.

OLAKANMI, E. O.; COCHRANE, R. F.; DALGARNO, K. W. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. **Progress in Materials Science**, v. 74, p. 401–477, 2015.

OLMOS, L. G. et. al. **3D DLP additive manufacturing: printer and validation**. Curitiba: 24º International Congress of Mechanical Engineering, 2017.

PEDERSEN, D. B.; HANSEN, H. N.; EIRÍKSSON, E. R. **Spatial accuracy of embedded surface coloring in color 3D printing**. Proceedings - ASPE 2015 Spring Topical Meeting: Achieving Precision Tolerances in Additive Manufacturing, p. 147–150, 2015.

PIRATELLI-FILHO, A.; LEVY-NETO, F. **Comportamento de vigas de compósitos granito-epóxi submetidas a vibrações mecânicas**. Campina Grande: 6º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2010.

RODRIGUES, A. Primeira impressora brasileira, **Revista Galileu**. Disponível em: <<http://revistagalileu.globo.com/Revista/Common/0,,EMI329483-18541,00-ESTUDANTE+DE+ENGENHARIA+CRIA+A+PRIMEIRA+IMPRESSORA+D+COMERCIAL+DO+PAIS.html>>. Acesso em: 01 out. 2017.

SAYYAD, A. S.; GHUGAL, Y. M. On the free vibration analysis of laminated composite and sandwich plates: A review of recent literature with some numerical results. **Composite Structures**, v. 129, p. 177–201, 2015.

SHIGLEY, J.; MISCHKE, C. **STANDARD HANDBOOK OF MACHINE DESIGN**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1996.

SHIRAZI, S. F. S. et al. A review on powder-based additive manufacturing for tissue engineering: selective laser sintering and inkjet 3D printing. **Science and Technology of Advanced Materials**, v. 16, n. 3, p. 1-20, 2015.

SOUZA, L. G. M. et al. Composite utilizing residues of marble and granite for building popular homes. **Journal of Building Engineering**, v. 9, n. 1, p. 192–197, 2017.

SUBRAHMANYA SWAMY, S. et al. Influence of Resin Content and Cast Iron Powder Addition on Vibration Characteristics of Granite Epoxy Composites. **International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology**, v. 3, n. 7, p. 14578–14588, 2014.

TANG, Y.; ZHAO, Y. F. A survey of the design methods for additive manufacturing to improve functional performance. **Rapid Prototyping Journal**, v. 22, n. 3, p. 569–590, 2016.

THE ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING. **Philosophy of Engineering**. Londres. p. 1-72. 2010.

TUMBLESTON, J. R. et al. Continuous liquid interface production of 3D objects. **Science**, v. 347, n. 6228, p. 1349–1352, 2015.

VOLPATO, N. **Prototipagem Rápida – Tecnologias e Aplicações**. São Paulo: Edgard Blucher, 244 p. 2007.

WANG, K.-C. Optimal high-rigidity structure design for CNC machine tools using CAE technique. **Engineering Computations**, v. 31, n. 8, p. 1761–1777, 2014.

WOHLERS, T.; GORNET, T. **History of Additive Manufacturing**. Wohlers Report 2014 - 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry, p. 1–34, 2014.

ZIEMIAN, C. W.; CRAWN III, P. M. Computer aided decision support for fused deposition modeling. **Rapid Prototyping Journal**, v. 7, n. 3, p. 138-147, 2001.