



**Universidade de Brasília - UnB**  
**Faculdade UnB Gama - FGA**  
**Engenharia Aeroespacial**

**Caracterização e avaliação da preditibilidade de  
modelos isotrópicos e ortotrópicos para materiais  
impressos com foco em otimizações topológicas**

**Autor: Arthur P. Wernke**

**Orientador: Prof. Ph.D. Eng. Manuel N. D. Barcelos Júnior**

**Brasília, DF**

**2019**



**Arthur P. Wernke**

**Caracterização e avaliação da preeditibilidade de modelos  
isotrópicos e ortotrópicos para materiais impressos com foco  
em otimizações topológicas**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Ph.D. Eng. Manuel N. D. Barcelos Júnior

Brasília, DF

2019

---

Arthur P. Wernke

Caracterização e avaliação da preditibilidade de modelos isotrópicos e ortotrópicos para materiais impressos com foco em otimizações topológicas/ Arthur P. Wernke. – Brasília, DF, 2019-

158 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Ph.D. Eng. Manuel N. D. Barcelos Júnior

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA , 2019.

1. Caracterização mecânica 2. Impressão 3D 3. Modelo isotrópico e ortotrópico 4. Modelagem numérica para materiais impressos. 5. Otimização topológica usando impressora 3D. I. Prof. Ph.D. Eng. Manuel N. D. Barcelos Júnior. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Caracterização e avaliação da preditibilidade de modelos isotrópicos e ortotrópicos para materiais impressos com foco em otimizações topológicas

CDU 02:141:005.6

---

**Arthur P. Wernke**

**Caracterização e avaliação da preditibilidade de modelos isotrópicos e ortotrópicos para materiais impressos com foco em otimizações topológicas**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 11 de Dezembro de 2019:

---

**Prof. Ph.D. Eng. Manuel N. D. Barcelos  
Júnior**  
Orientador

---

**Prof. Ph.D. Artem Andrianov**  
Convidado 1

---

**Prof. Ph.D. Eng. Emmanuel P. R. Lima**  
Convidado 2

Brasília, DF  
2019

*Este trabalho é dedicado a todos que de alguma forma contribuíram para esta caminhada longa, árdua, por muitas vezes exaustiva, mas com vultoso valor.*

# Agradecimentos

Um forte agradecimento a minha força de vontade, sem a qual não teria conseguido chegar na etapa final que este estudo simboliza.

Agradeço especialmente a minha mãe, Edna Lúcia Pereira Wernke, pela grande aposta feita principalmente nesta reta final, sem o seu apoio minhas ambições não se tornariam realidade.

Agradeço aos meus pais, Jair Wernke e Edna Lúcia Pereira Wernke, pelo apoio no qual possibilitou minha exclusiva dedicação ao curso, contribuindo de forma ímpar a minha formação.

Agradecimento a minha namorada, Daniele Dias Sousa, no qual sempre estive ao meu lado nas dificuldades, sempre proporcionando momentos de felicidade e relaxamento, sendo mais do que namorada, se tornando minha maior confidente, amiga e razão de muitos sorrisos.

Agradecimentos a todos os professores do curso de engenharia aeroespacial pela garra em tornar o curso cada vez melhor, enfrentando todos os problemas e dificuldades que aparecem. Agradeço em especial ao professor Ph.D. Eng. Manuel Nascimento Dias Barcelos Júnior pela exímia orientação do presente trabalho.

Agradecimento aos amigos da panela, no qual participaram da formação e estarão presentes na continuidade profissional e da minha vida.

A todos, obrigado.

*“Não pense que é capaz. Saiba que é”. “Nunca deixe alguém te dizer que não consegue fazer algo”, eles não sabem o caminho que foi trilhado, “cedo ou tarde, você vai aprender, assim como eu aprendi, que existe uma diferença entre conhecer o caminho e trilhar o caminho”.*

*Entenda que “não importa o que dizem a você, palavras e ideias podem mudar o mundo”, sendo que “algumas batalhas são vencidas com espadas e lanças, outras com papel e caneta”.*

*“Primeiro você tem que se entregar, primeiro você tem que saber não temer”, “você tem que estar disposto a fracassar, se você tem medo de fracassar, não irá muito longe”. “Os homens erram, os grandes homens confessam que erraram” e aprendem com o erro, “a experiência é o nome que damos aos nossos erros”, basta você escolher como encara-los, “você pode encarar um erro como uma besteira a ser esquecida, ou como um resultado que aponta uma nova direção”, com isso “eu posso não ter ido para onde eu pretendia ir, mas eu acho que acabei terminando onde eu pretendia estar”.*

*Autores (em ordem): The Matrix, Morpheu; A procura da felicidade, Christopher Gardner; The Matrix, Morpheu; Sociedade dos Poetas Mortos, John Keating; Game of Thrones, Tywin Lannister; Clube da Luta, Tyler Durden; Steve Jobs; Voltaire; Oscar Wilde; Steve Jobs e O Guia do Mochileiro das Galáxias, Douglas Adams.*

# Resumo

Este estudo apresenta a caracterização mecânica de materiais impressos com diferentes parâmetros, a partir dos dados obtidos foi criado dois modelos de materiais para utilização numérica, isotrópico e ortotrópico. Para isso, no estudo tem inicialmente abordado os fundamentos teóricos deste estudo, com principal processo fabril a manufatura aditiva com foco para o processo denominado deposição por material fundido no qual se utiliza de material polimérico termoplástico e em seguida introduzido as otimizações topológicas com integração de uso com elementos finitos. Este estudo tem como principal objetivo caracterizar o material impresso, desta forma foi proposto um modelo numérico com capacidade preditiva para comportamento em flexão e aplicar no projeto de corpos de prova otimizados topologicamente. Este modelo numérico parte da hipótese de que o material impresso pode ser descrito primariamente como material isotrópico e homogêneo, mas para maior precisão pode ser considerado como ortotrópico e homogêneo. A partir dos dados dos ensaios da tração foi possível construir o modelo isotrópico e ortotrópico e realizar sua validação para isso foi realizada avaliação da capacidade de predição através da comparação numérica com os ensaios de flexão em diferentes ângulos de impressão ( $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$  e  $90^\circ$ ) e através de ensaio de tração com ângulos de impressão de  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $60^\circ$ . O modelo isotrópico apresenta diferença média superior a 15% no comparativo em flexão, enquanto modelo ortotrópico apresenta diferença média inferior a 5%, estas porcentagens são semelhantes para comparativo da tração em diferentes ângulos de impressão. As metodologias de otimização topológica foram conduzidas via ANSYS e apontaram para um comportamento preditivo válido. Isto garante a aplicabilidade da hipótese de material homogêneo e isotrópico para utilização do método SIMP (sigla do inglês para *Solid Isotropic Material with Penalty*) dentro do pacote de otimização topológica e da hipótese de material homogêneo ortotrópico para previsibilidade do comportamento do material em peças impressas. As hipóteses criadas foram comprovadas através de ensaios experimentais e testes numéricos, desta forma o objetivo principal deste estudo foi atingido.

**Palavras-chaves:** Modelo ortotrópico; modelo isotrópico; materiais impressos; otimização topológica.

# Abstract

This study presents the mechanical characterization of printed materials with different parameters, from the obtained data was created two models of materials for numerical use, isotropic and orthotropic. For this, the theoretical foundations of this study are initially approached, with the main manufacturing process being the additive manufacturing focusing on the process called melt deposition in which thermoplastic polymeric material is used and then the topological optimizations with integration of use with finite elements are introduced. The main objective of this study is to characterize the printed material. Thus, a numerical model with predictive capacity for flexural behavior is proposed and applied in the design of topologically optimized specimens. This numerical model assumes that printed matter can be described primarily as isotropic and homogeneous material, but for greater accuracy can be considered as orthotropic and homogeneous. From the tensile test data it is possible to construct the isotropic and orthotropic model and to validate it. The prediction capacity is evaluated by numerical comparison with the flexural tests at different printing angles ( $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$  and  $90^\circ$ ) and through tensile testing with printing angles of  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  and  $60^\circ$ . The isotropic model has an average difference greater than 15% in the flexural comparison, while the orthotropic model has an average difference of less than 5%, these percentages are similar for comparative traction at different printing angles. The topological optimization methodologies were conducted via ANSYS and pointed to a valid predictive behavior. This ensures the applicability of the homogeneous and isotropic material hypothesis for use of the SIMP (Solid Isotropic Material with Penalty) method within the topological optimization workbench and the orthotropic homogeneous material hypothesis for predictability of material behavior in printed parts. The hypotheses created were proved through experimental and numerical tests, thus the main objective of this study was reached.

**Key-words:** Orthotropic model; isotropic model; printed materials; topological optimization.

# Lista de ilustrações

Figura 2.1 – Esquemático do processo da fabricação SLA (Ngo et al. (2018) adaptado). . . . .	32
Figura 2.2 – Esquemático dos principais métodos de fabricação por MA (Ngo et al. (2018) adaptado). . . . .	33
Figura 2.3 – Esquemático com a ordem de todo o processo para impressão 3D (Dizon et al. (2018) adaptado). . . . .	35
Figura 2.4 – Esquemático de um padrão de preenchimento típico (Turner e Gold (2015) adaptado). . . . .	37
Figura 2.5 – Esquemático com o efeito da velocidade de movimentação da cabeça de impressão no cordão de impressão (Turner e Gold (2015) adaptado). . . . .	38
Figura 2.6 – Esquemático demonstrativo da diferença de resolução, com esquerda stl com maior resolução e direita com menor resolução (TURNER; GOLD, 2015). . . . .	38
Figura 2.7 – Esquemático demonstrativo dos <i>airgaps</i> para diferentes calibragens de impressão (Turner e Gold (2015) adaptado). . . . .	39
Figura 2.8 – Esquemático demonstrativo do erro proveniente da tesselação (Hällren, Pejryd e Ekengren (2016) adaptado). . . . .	40
Figura 2.9 – Esquemático com exemplo de como funciona a tesselação (Hällren, Pejryd e Ekengren (2016) adaptado). . . . .	41
Figura 2.10–Esquemático do projeto LAICAnSat (Alves et al. (2016) adaptado). . . . .	42
Figura 2.11–Imagens da gravação do eclipse momentos antes (esquerda) e durante sua totalidade (direita) (WERNKE et al., 2018). . . . .	43
Figura 2.12–Estrutura impressa e integrada com eletrônica para missão Kuaray. . . . .	43
Figura 3.1 – Comparativo entre micromecânica (esquerda) e macromecânica (direita) (Oliveira (2018) adaptado). . . . .	46
Figura 4.1 – Domínio para otimizar topologicamente (Bendsoe e Sigmund (2003), adaptado). . . . .	50
Figura 4.2 – Esquemático do funcionamento da otimização topológica (Meng et al. (2019) adaptado). . . . .	51
Figura 4.3 – Pseudo-módulo de elasticidade em função do fator de penalização (Dassault Systemes (2019), adaptado). . . . .	52
Figura 4.4 – Tipos de malha utilizado no presente estudo (Seshu (2003), adaptado). . . . .	53
Figura 4.5 – Domínio para otimizar topologicamente (Meng et al. (2019), adaptado). . . . .	55
Figura 4.6 – <i>Cockpit</i> otimizado (MENG et al., 2019). . . . .	56
Figura 5.1 – Impressora Anet A8M <i>Double</i> . . . . .	59
Figura 5.2 – Corpos de prova fatiados no Cura. . . . .	61

Figura 5.3 – Ângulos de impressão (YANG et al., 2018) . . . . .	63
Figura 5.4 – Corpo de prova tipo I da norma ASTM D638-14 (ASTM (2014) adaptado). . . . .	64
Figura 5.5 – Corpo de prova para materiais para moldagem (Termoplásticos e Termofixos). . . . .	65
Figura 5.6 – Máquina de ensaio Instron 8801. . . . .	67
Figura 5.7 – Posição do extensômetro no corpo de prova. . . . .	68
Figura 5.8 – Adaptador para ensaio de flexão. . . . .	69
Figura 5.9 – Microscópio confocal OLS4100 OLYMPUS (Olympus (2013) adaptado). . . . .	70
Figura 6.1 – Fluxo de simulação utilizado (fonte: autor). . . . .	72
Figura 6.2 – Fluxo de simulação utilizado (fonte: autor). . . . .	73
Figura 6.3 – Modelo de tração em ANSYS. . . . .	74
Figura 6.4 – Campo de tensão obtido via ANSYS e local de tensão máxima. . . . .	75
Figura 6.5 – Modelo de flexão em ANSYS. . . . .	76
Figura 6.6 – Condições de contorno para análise de convergência de malha com caso de estudo 1 (GUNWANT; MISRA, 2012). . . . .	77
Figura 6.7 – Condições para caso de estudo 2 (fonte: Gunwant e Misra (2012) com adaptações). . . . .	77
Figura 6.8 – Condições para caso de estudo 3 (LIU et al., 2018). . . . .	78
Figura 6.9 – Condições para caso de estudo 4 (PARK; SUTRADHAR, 2014). . . . .	78
Figura 6.10–Condições para caso de estudo 5. . . . .	79
Figura 6.11–Condições de apoio para ensaio da ponte. . . . .	80
Figura 7.1 – Discretizações para cada processo adotado. . . . .	83
Figura 7.2 – Comparativo da zona curva do corpo de prova para tração discretizado (vermelho) e não discretizado (preto). . . . .	84
Figura 7.3 – Análise de convergência do volume para discretização do stl. . . . .	85
Figura 7.4 – Caixa da impressora. . . . .	86
Figura 7.5 – Variação da temperatura durante os 35 primeiros minutos de impressão. . . . .	87
Figura 7.6 – Influência do ambiente externo na temperatura interna da caixa. . . . .	87
Figura 7.7 – Gráfico tensão-deformação para impressão de PLA em $[\pm 45]$ . . . . .	90
Figura 7.8 – Curva tensão-deformação média e seus desvios padrões para cada material. . . . .	91
Figura 7.9 – Gráfico tensão-deformação para os 3 conjuntos de impressão em $[\pm 45]$ . . . . .	93
Figura 7.10–Variação da porosidade em função da velocidade e temperatura de impressão. . . . .	95
Figura 7.11–Zonas de vazio e sulcos nos corpos de prova. . . . .	98
Figura 7.12–Gráfico de convergência para modelo de tração. . . . .	99
Figura 7.13–Campo de tensão obtido via ANSYS e local de tensão máxima. . . . .	100
Figura 7.14–Curvas carga-deformação comparativo entre numérico e experimental para diferentes modelos. . . . .	101
Figura 7.15–Gráfico de convergência para modelo de flexão. . . . .	101

Figura 7.16–Curvas tensão-deformação em flexão para diferentes conjuntos de parâmetros de impressão e diferentes orientações das fibras. . . . .	103
Figura 7.17–Curvas carga-deformação comparativo entre numérico e experimental para diferentes modelos em flexão com diferentes orientações das fibras. . . . .	105
Figura 7.18–Curvas carga-deformação em flexão para diferentes conjuntos de parâmetros de impressão e diferentes orientações das fibras. . . . .	109
Figura 7.19–Curvas tensão-deformação em flexão para diferentes conjuntos de parâmetros de impressão e diferentes orientações das fibras. . . . .	110
Figura 7.20–Curvas carga-deformação flexional comparativo entre numérico em modelo ortotrópico e experimental para diferentes ângulos de impressão . . . . .	112
Figura 7.21–Curvas carga-deformação comparativo entre numérico em diferentes ângulos e experimental para diferentes ângulos de impressão. . . . .	114
Figura 7.22–Resultados da geometria otimizada para diferentes refinamentos de malha com elementos retangulares. . . . .	117
Figura 7.23–Convergência da porcentagem de massa resultante da otimização para malha retangular. . . . .	118
Figura 7.24–Resultados da geometria otimizada para diferentes refinamentos de malha com elementos triangulares. . . . .	120
Figura 7.25–Convergência da porcentagem de massa resultante da otimização para malha triangular. . . . .	121
Figura 7.26–Resultado obtido para caso de estudo 1 das otimizações topológicas. . . . .	122
Figura 7.27–Resultado obtido para caso de estudo 2 das otimizações topológicas. . . . .	123
Figura 7.28–Resultado obtido para caso de estudo 3 das otimizações topológicas. . . . .	124
Figura 7.29–Resultado obtido para caso de estudo 4 das otimizações topológicas. . . . .	125
Figura 7.30–Resultado obtido para caso de estudo 5 das otimizações topológicas. . . . .	126
Figura 7.31–Vistas para ponte. . . . .	127
Figura 7.32–Gráfico de Força-deslocamento para ponte com diferentes apoios. . . . .	128
Figura 7.33–Gráfico de convergência para modelo da ponte. . . . .	129
Figura 7.34–Gráfico de Carga-deslocamento para caso de estudo 4 com diferentes apoios e comparativo entre consideração isotrópica e ortotrópica. . . . .	131
Figura A.1 –Peças da impressora desmontada. . . . .	142
Figura A.2–Início da montagem. . . . .	143
Figura A.3–Impressora Anet A8M <i>Double</i> . . . . .	143
Figura A.4–Instalação do software de fatiamento e funcionamento inicial. . . . .	144
Figura A.5–Impressora durante teste de funcionamento. . . . .	144
Figura A.6–Posição do corpo de prova de nivelamento de mesa simples. . . . .	145
Figura B.1 –Relação entre deformação da máquina e do extensômetro. . . . .	147

Figura E.1 – Esquemático demonstrando a definição dos sentido longitudinal e transversal em junção ao sentido dos eixos (Oliveira (2018) adaptado). . . . .	156
Figura E.2 – Sistema de coordenadas em relação a impressora 3D (Anet (2018) adaptado).	157

# Lista de tabelas

Tabela 5.1 – Dimensões e tolerâncias para corpo de prova do tipo I (ASTM (2014) adaptado). . . . .	64
Tabela 7.1 – Características dos .stl gerados com diferentes métodos. . . . .	82
Tabela 7.2 – Características dimensionais médias dos grupos de CPT. . . . .	89
Tabela 7.3 – Propriedades médias para conjunto 3 dos parâmetros de impressão. . . . .	92
Tabela 7.4 – Características mássicas médias para cada conjunto de parâmetros de impressão. . . . .	93
Tabela 7.5 – Propriedades médias para diferentes conjuntos dos parâmetros de impressão. . . . .	94
Tabela 7.6 – Características dimensionais médias dos corpos de prova de flexão. . . . .	102
Tabela 7.7 – Propriedades obtidas para ensaio de flexão. . . . .	103
Tabela 7.8 – Resultados percentuais para modelos isotrópicos em tração e flexão. . . . .	105
Tabela 7.9 – Propriedades calculadas para modelo ortotrópico. . . . .	106
Tabela 7.10–Propriedades obtidas para ensaio de flexão do conjunto 3 com diferentes direções de impressão. . . . .	111
Tabela 7.11–Resultados percentuais para modelos ortotrópico em tração, flexão e diferentes ângulos. . . . .	114
Tabela 7.12–Quantidade de iterações necessárias para convergência para cada refino em malha retangular. . . . .	117
Tabela 7.13–Quantidade de iterações necessárias para convergência para cada refino em malha triangular. . . . .	120
Tabela 7.14–Características dimensionais médias para corpo de prova da ponte. . . . .	127
Tabela 7.15–Propriedades obtidas para ensaio de flexão na ponte. . . . .	129
Tabela 7.16–Comparativo entre numérico e experimental para caso de estudo 4 com diferentes considerações isotrópicas e ortotrópicas. . . . .	132
Tabela A.1–Corpos de calibração do fluxo. . . . .	145
Tabela A.2–Corpos de calibração do fluxo. . . . .	146
Tabela C.1 – Número serial para corpos de prova. . . . .	148
Tabela C.2 – Características dimensionais de cada corpo de prova de tração. . . . .	151
Tabela C.3 – Características dimensionais de cada corpo de prova de flexão. . . . .	151
Tabela C.4 – Características de massa de cada corpo de prova. . . . .	151

# Lista de quadros

Quadro 2.1 – Principais características do processo de fabricação FDM/FFF (Killen et al. (2018), Ngo et al. (2018) e Huang et al. (2015) adaptado). . . . .	34
Quadro 2.2 – Principais características da impressão 3D (Berman (2012) e Ngo et al. (2018) adaptado). . . . .	36
Quadro 3.1 – Número das constantes elásticas para materiais com diferentes graus de anisotropia e as constantes de engenharia usuais (Silva (2005) adaptado). . . . .	47
Quadro 3.2 – Relação entre constantes de engenharia (Chen e Saleeb (1994), adaptado). . . . .	49
Quadro 5.1 – Propriedades informadas pela fabricante do filamento (UP3D, 2019) . . . . .	58
Quadro 5.2 – Especificações da impressora 3D Anet A8M <i>Double</i> (Anet 3D Printer (2018), adaptado). . . . .	59
Quadro 5.3 – Parâmetros de impressão adotados para fabricação dos corpos de prova. . . . .	62
Quadro 5.4 – Características do maquinário Instron 8801 (Instron (2012), adaptado). . . . .	67
Quadro 5.5 – Características do extensômetro Instron 2620-601 (Instron (2018) adaptado). . . . .	68
Quadro 5.6 – Características do microscópio confocal OLYMPUS LEXT OLS4100 (Olympus (2013) adaptado). . . . .	70
Quadro 7.1 – Propriedades utilizadas para construção dos modelos isotrópicos. . . . .	99
Quadro 7.2 – Propriedades utilizadas para construção dos modelos ortotrópico. . . . .	107

# Lista de abreviaturas e siglas

## Processos

MA	Manufatura Aditiva
SLS	Sinterização Seletivo a Laser
SLM	Derretimento Seletivo a Laser
FDM	Modelagem por Deposição Fundida (sigla em inglês para <i>Fused Deposition Modeling</i> )
FFF	Fabricação de Filamentos Fundidos
PR	Prototipagem Rápida
SLA	Estereolitografia
TND	Teste Não Destrutivo

## Alta recorrência

CP	Corpo de Prova
CPT	Corpo de Prova para Tração
CPF	Corpo de Prova para Flexão
PI	Parâmetros de Impressão
OT	Otimização Topológica

## Polímeros

HIPS	Poliestireno de Alto Impacto
PLA	Poliácido Láctico
PLAC	Poliácido Láctico Carbono
PE	Polietileno
PP	Polipropileno

PS	Poliestireno
PVA	Acetato de Polivinila
PVC	Policloreto de vinila
PET	Politereftalato de etileno
PHB	Poli(hidroxibutirato)
PEEK	Poli(éter-éter-cetona)
PAEK	Poli(alril-éter-cetona)
PEI	Polieterimida
PMMA	Polimetilmetacrilato
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
PETG	Politereftalato de Etileno Glicol
PETGC	Politereftalato de Etileno Glicol Carbono

### **Outros materiais**

PRFV	Polímero Reforçado com Fibra de Vidro
PRFC	Polímero Reforçado com Fibra de Carbono

### **Mecânica**

EPT	Estado Plano de Tensão
SIMP	<i>Solid Isotropic Material with Penalization</i>

### **Abreviaturas gerais**

LAICA	Laboratório para Aplicação e Inovação em Ciências Aeroespaciais
CAsB	Clube de Astronomia de Brasília
CAD	Computer-Aided Design
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>

STL            *Standard Tessellating Language* (Linguagem Padrão de Tesselação)

ABNT        Associação Brasileira de Normas Técnicas

# Lista de símbolos

$E$	Módulo de elasticidade para material isotrópico	[GPa]
$E_1$	Módulo de elasticidade na direção de 1	[GPa]
$E_2$	Módulo de elasticidade na direção de 2	[GPa]
$E_3$	Módulo de elasticidade na direção de 3	[GPa]
$E_0$	Módulo de elasticidade (isotrópico) original da peça a ser otimizada topologicamente	[GPa]
$G$	Módulo de cisalhamento para material isotrópico	[GPa]
$G_{12}$	Módulo de cisalhamento na direção de 12	[GPa]
$G_{13}$	Módulo de cisalhamento na direção de 13	[GPa]
$G_{23}$	Módulo de cisalhamento na direção de 23	[GPa]
$K$	Módulo de Bulk	[GPa]
$\epsilon_1$	Deformação normal em direção de 1	[mm/mm]
$\epsilon_2$	Deformação normal em direção de 2	[mm/mm]
$\epsilon_3$	Deformação normal em direção de 3	[mm/mm]
$\epsilon_f$	Deformação normal para corpo de prova em flexão	[mm/mm]
$\gamma_{23}$	Deformação angular em direção de 23	
$\gamma_{31}$	Deformação angular em direção de 31	
$\gamma_{12}$	Deformação angular em direção de 12	
$\sigma_1$	Tensão normal na direção de 1	[MPa]
$\sigma_2$	Tensão normal na direção de 2	[MPa]
$\sigma_3$	Tensão normal na direção de 3	[MPa]
$\sigma_f$	Tensão normal para corpo de prova de flexão	[MPa]
$\sigma_y$	Tensão de escoamento	[MPa]
$\sigma_{ult}$	Tensão limite	[MPa]

$\tau_{23}$	Tensão cisalhante na direção de 23	[MPa]
$\tau_{31}$	Tensão cisalhante na direção de 31	[MPa]
$\tau_{12}$	Tensão cisalhante na direção de 12	[MPa]
$\nu$	Coefficiente de Poisson para material isotrópico	
$\nu_{12}$	Coefficiente de Poisson na direção de 12	
$\nu_{23}$	Coefficiente de Poisson em direção de 23	
$\Delta L$	Variação no comprimento do espécime	[mm]
$\rho$	Densidade	[g cm <sup>-3</sup> ]
$\rho_e$	Densidade em cada elemento	[g cm <sup>-3</sup> ]
$L$	Comprimento do espécime	[mm]
$P$	Carga aplicada	[N]
$A$	Área da seção transversal	[mm <sup>2</sup> ]
$T$	Espessuras	[mm]
$L_s$	Comprimento entre apoios para ensaio de flexão	[mm]
$d$	Espessura do corpo de prova de flexão	[mm]
$b$	Largura do corpo de prova de flexão	[mm]
$R$	Velocidade do ensaio de flexão	[mm min <sup>-1</sup> ]
$Z$	Taxa de deformação	
$D$	Deflexão durante ensaio de flexão	[mm]
$D_{fim}$	Deflexão de parada do ensaio de flexão	[mm]
$m$	Inclinação da parte linear da curva carga-deflexão	[N mm <sup>-1</sup> ]
$\Omega$	Domínio a ser otimizado	
$U$	Matriz global de deslocamento	
$K$	Matriz global de rigidez	
$u_e$	Matriz local de deslocamento	
$k_e$	Matriz local de rigidez	

$p$	Potência de penalização
$B_e$	matriz tensão-deslocamento
$D_e$	Matriz constitutiva

# Sumário

1	INTRODUÇÃO . . . . .	24
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO . . . . .	24
1.2	MOTIVAÇÃO . . . . .	25
1.3	JUSTIFICATIVA . . . . .	26
1.4	OBJETIVOS . . . . .	26
1.4.1	Objetivo geral . . . . .	26
1.4.2	Objetivos específicos . . . . .	26
1.5	HIPÓTESES . . . . .	26
1.6	ABORDAGEM METODOLÓGICA . . . . .	27
1.7	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO . . . . .	28
I	FUNDAMENTOS TEÓRICOS E ESTADO DA ARTE	30
2	MANUFATURA ADITIVA PARA POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS	31
2.1	ESTADO DA ARTE . . . . .	31
2.2	TIPOS DE MANUFATURA ADITIVA . . . . .	32
2.3	MODELAGEM POR DEPOSIÇÃO FUNDIDA . . . . .	34
2.3.1	Principais materiais . . . . .	39
2.4	<i>STANDARD TESSELLATING LANGUAGE</i> . . . . .	40
2.5	APLICAÇÕES AEROESPACIAIS DA IMPRESSÃO 3D . . . . .	41
3	MECÂNICA ESTRUTURAL . . . . .	45
3.1	MICROME CÂNICA E MACROME CÂNICA . . . . .	45
3.2	ISOTROPIA, ORTOTROPIA E ANISOTROPIA . . . . .	46
3.3	ELASTICIDADE DA ORTOTROPIA À ISOTRPIA . . . . .	47
4	OTIMIZAÇÕES TOPOLÓGICAS E FUNDAMENTOS NUMÉRICOS	50
4.1	CONTEXTUALIZAÇÃO . . . . .	50
4.2	PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA . . . . .	51
4.2.1	Modelo numérico . . . . .	53
4.3	APLICAÇÕES AEROESPACIAIS . . . . .	54
II	FUNDAMENTAÇÃO METODOLÓGICA	57
5	METODOLOGIA EXPERIMENTAL . . . . .	58

<b>5.1</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS</b>	<b>58</b>
<b>5.2</b>	<b>FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA</b>	<b>58</b>
5.2.1	Maquinário utilizado para fabricação	58
5.2.2	Metodologia adotada de modelagem	60
5.2.3	Software fatiador e parâmetros de impressão	60
5.2.4	Ângulos de impressão	63
<b>5.3</b>	<b>ENSAIOS, EXTENSOMETRIA E MEDIÇÕES</b>	<b>63</b>
5.3.1	Ensaio de tração	64
5.3.2	Ensaio de flexão	65
5.3.3	Maquinário para realização dos ensaios	66
5.3.4	Medições físicas	69
5.3.5	Análise via microscópio confocal	69
<b>6</b>	<b>METODOLOGIA NUMÉRICA</b>	<b>71</b>
<b>6.1</b>	<b>FLUXO DE SIMULAÇÃO</b>	<b>71</b>
6.1.1	Software utilizado	74
<b>6.2</b>	<b>MODELO BASE</b>	<b>74</b>
6.2.1	Modelo de tração	74
6.2.2	Modelo de Flexão	75
6.2.3	Modelo para otimização topológica	76
<b>III</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>81</b>
<b>7</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS, NUMÉRICOS E DISCUSSÕES</b>	<b>82</b>
<b>7.1</b>	<b>PRÉ E ÍTERIM IMPRESSÃO</b>	<b>82</b>
7.1.1	Discretização do arquivo .stl	82
7.1.2	Caixa para redução das flutuações térmicas	85
7.1.3	Entupimentos	88
<b>7.2</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL</b>	<b>89</b>
7.2.1	Diferentes parâmetros de impressão	92
<b>7.3</b>	<b>DIFERENTES MODELOS DO MATERIAL IMPRESSO</b>	<b>98</b>
7.3.1	Modelo isotrópico	98
7.3.2	Modelo ortotrópico	106
<b>7.4</b>	<b>OTIMIZAÇÕES TOPOLÓGICAS</b>	<b>115</b>
7.4.1	Efeitos de convergência de malha para otimização topológica	115
7.4.2	Testes metodológicos da otimização topológica	121
7.4.3	Otimização topológica da ponte	126

<b>IV</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>133</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES</b> . . . . .	<b>134</b>
<b>9</b>	<b>RECOMENDAÇÕES</b> . . . . .	<b>135</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>136</b>
	<b>APÊNDICE A – MONTAGEM E AJUSTES DA IMPRESSORA 3D</b> . . . . .	<b>142</b>
<b>A.1</b>	<b>Montagem</b> . . . . .	<b>142</b>
<b>A.2</b>	<b>Nivelamento de mesa</b> . . . . .	<b>145</b>
<b>A.2.1</b>	<b>Nivelamento de mesa simples</b> . . . . .	<b>145</b>
<b>A.3</b>	<b>Ajuste do fluxo de extrusão</b> . . . . .	<b>146</b>
	<b>APÊNDICE B – AJUSTE DA DEFORMAÇÃO MEDIDA</b> . . . . .	<b>147</b>
	<b>APÊNDICE C – TABELAS</b> . . . . .	<b>148</b>
<b>C.1</b>	<b>Detalhamento do número serial</b> . . . . .	<b>148</b>
<b>C.2</b>	<b>Características físicas de cada corpo de prova</b> . . . . .	<b>150</b>
	<b>APÊNDICE D – PLANTAS</b> . . . . .	<b>153</b>
<b>D.1</b>	<b>Corpo de prova para tração</b> . . . . .	<b>154</b>
<b>D.2</b>	<b>Corpo de prova para flexão</b> . . . . .	<b>155</b>
	<b>APÊNDICE E – SISTEMA DE COORDENADAS E PADRÕES</b> . . . . .	<b>156</b>
<b>E.1</b>	<b>Sistema de Coordenadas</b> . . . . .	<b>156</b>
<b>E.2</b>	<b>Código de orientação do material</b> . . . . .	<b>157</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Os componentes no qual constituem estruturas aeronáuticas e aeroespaciais muitas vezes possuem geometrias complexas e são feitos de materiais avançados, estes materiais são difíceis de processar, custosos e muitas vezes demorado de se fabricar através de processos convencionais (HUANG et al., 2015; NGO et al., 2018). Além disso, a produção aeroespacial é geralmente pequena, limitada a um máximo de milhares de peças (HUANG et al., 2015).

O processo de fabricação denominado de Manufatura Aditiva (MA) é capaz de fabricar peças sob demanda, sem a necessidade de moldes ou equipamento exclusivo para um tipo de peça.

As tecnologias de MA são altamente adequadas para aplicações aeroespaciais (HUANG et al., 2015), logo, no futuro, satélites, peças de serviço de espaçonaves e até mesmo edifícios de exploração espacial poderiam ser fabricados longe da terra através de tecnologia da MA (LU; LI; TIAN, 2015).

As peças fabricadas por MA tiveram um crescimento anual médio de 25,4% nos últimos 25 anos. Em 2012 houve um crescimento de 27,4% de peças fabricadas por MA (HUANG et al., 2015).

Em consequência há um crescimento do número de impressoras 3D comercializadas o que resultou em um mercado que cresceu de 66 unidades compradas em 2007 para 23.265 unidades em 2011 (ROBERSON; ESPALIN; WICKER, 2013), já em 2012 houve um crescimento de 46,3% da quantidade de impressoras 3D vendidas (HUANG et al., 2015), este obteve entre 2013 e 2016 um crescimento médio de 33% no uso dessa tecnologia (STANSBURY; IDACAVAGE, 2016).

A indústria aeroespacial representa cerca de 18,2% do mercado total de MA, este setor foi considerado um dos campos mais promissores no futuro (NGO et al., 2018).

Devido a facilidade agregada ao processo e flexibilidade apontado por Reichental (2010), em conjunto com maior acesso do público geral as técnicas de Prototipagem Rápida (PR) (LU; LI; TIAN, 2015), há uma grande variação no processo produtivo e, por consequência, nas propriedades mecânicas. Desta forma surge a problemática de ser necessário caracterizar mecanicamente o material para aplicações de engenharia.

Uma das principais aplicações de engenharia é a otimização da topologia (OT), este tipo de otimização engloba um dos três subcampos da otimização estrutural (os outros dois são otimização de dimensões e forma) (MENG et al., 2019).

A OT é principalmente empregada no estágio inicial do projeto estrutural. A OT apresenta destaque no projeto conceitual, responsável por produzir estruturas com peso competitivo, e melhor distribuição de material (MENG et al., 2019).

As últimas décadas apresentam desenvolvimento significativo da OT em aspectos teóricos e práticos, sua principal impulsionadora a MA (MENG et al., 2019) permite uma nova opção para fabricar estruturas complexas (YANG et al., 2018), desta forma projetar a peça de tal maneira que seja assegurada uma transição perfeita entre o projeto ideal e a fabricação da peça final (MENG et al., 2019).

Recentemente, a combinação de impressão 3D e métodos numéricos de design, especialmente o método de otimização de topologia, lidera uma nova tendência nos projetos. Entretanto este demanda modelos numéricos com atenção cuidadosas nas impressoras 3D, devido que o material é de grande importância para esclarecer como os parâmetros de fabricação afetam os projetos de otimização e as propriedades mecânicas dos produtos finais (YANG et al., 2018).

Desta forma este estudo procura caracterizar o material impresso com diferentes sentidos de impressão com foco na aplicação em geometrias complexas como as otimizadas topologicamente.

## 1.2 MOTIVAÇÃO

Os materiais fabricados por impressão FDM 3D convencional encontram problemas devido as baixas propriedades mecânicas para aplicações de engenharia, embora a otimização dos parâmetros de processamento, tais como a direção de impressão e espessura de impressão, tenha sido investigada para melhorar as propriedades mecânicas da resina termoplástica com foco nas aplicações de engenharia (MATSUZAKI et al., 2016).

Obter componentes mecanicamente fortes e ampliar a aplicabilidade da impressão 3D do tipo FDM em estruturas aeroespaciais e automotivas é um objetivo importante da fabricação industrial (MATSUZAKI et al., 2016). Para essa aplicação é de suma importância caracterizar o material para que este seja aplicado da melhor forma no projeto estrutural, para melhores otimizações, economia de material, tempo e recursos.

A MA é demonstrada uma alternativa aos métodos convencionais de fabricação, como usinagem, fundição ou a combinação deles, com características que favorecem a fabricação de peças complexas (MENG et al., 2019).

Este trabalho foi motivado devido a grande gama de possibilidades que estes materiais permitem agregar ao projeto estrutural focados para aplicações de engenharia de alto nível através de otimização topológica.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Vários autores abordam a utilização de impressoras 3D com foco não apenas em peças estéticas, mas também aplicações de engenharia de alto nível.

Estudos como o realizado por [Luca \(2017\)](#) apontam que aparecem novos desafios com MA, necessidade de uma nova geração de software de projeto e fatiamento, este no qual precisaria não apenas dividir o arquivo CAD em camadas para que o MA ocorra, mas também terá a tarefa de orientar as fibras contínuas em uma direção ideal para obter o desempenho mecânico desejado em conjunto com formato que propicie economia de material.

Neste estudo foi entendido o material impresso, para que este seja aplicado no desenvolvimento do design otimizado topologicamente de peças impressas fabricadas por MA nas quais abordam características ótimas voltadas a atender os requisitos de projetistas.

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 Objetivo geral

Avaliar a capacidade preditiva de modelos isotrópicos e ortotrópicos para materiais impressos com foco em aplicações em peças otimizadas topologicamente.

### 1.4.2 Objetivos específicos

Para realizar o objetivo geral, o estudo é dividido em subetapas de execução, estes recebem a denominação de objetivos específicos, nos quais são:

- Caracterizar o material impresso;
- Avaliar a influência da temperatura e velocidade de impressão nas propriedades mecânicas da impressão;
- Avaliar a dependência direcional do cordão de impressão nos corpos de prova impressos;
- Propor modelo isotrópico e ortotrópico para simulações numéricas;
- Otimizar topologicamente e produzir corpos de prova;
- Avaliar a diferença entre modelo isotrópico e ortotrópico para corpos de prova otimizados e não otimizados.

## 1.5 HIPÓTESES

Os materiais impressos inicialmente podem ser modelados numericamente como materiais isotrópicos ([ZOU et al., 2016](#)), desde que as cargas envolvidas sejam impostas às condições

de carregamento longitudinal, ou seja na direção principal do sentido de impressão (AHN et al., 2002).

Em caso de necessidade de minimizar erros e atender a carregamentos transversais ao sentido de impressão, os materiais impressos demandam modelagem numérica com consideração de material ortotrópico (DIZON et al., 2018).

Os materiais impressos permitem serem modelado com a premissa de que este possui coeficiente de Poisson independente dos parâmetros de impressão e constante para todas as direções principais e no qual é um material isotrópico para cada direção em separado. Desta forma torna-se possível modela-lo com um número reduzido de ensaios.

Os materiais impressos podem passar por otimizações topológicas do método *Solid Isotropic Material with Penalization* (SIMP) sem comprometer os resultados obtidos geometricamente (PARK; SUTRADHAR, 2014).

## 1.6 ABORDAGEM METODOLÓGICA

Este estudo utiliza de metodologias experimentais para caracterização mecânica de materiais impressos, esta caracterização é feita através de ensaio de tração e flexão, debatido na Seção 5.3.1 e 5.3.2, respectivamente.

A metodologia numérica adotada no presente estudo parte da hipótese de material isotrópico e homogêneo, desta forma é modelado com propriedades isotrópicas, como módulo de elasticidade ( $E$ ) e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ).

Em seguida foi modelado como material ortotrópico, homogêneo e consideração das hipóteses apresentadas na Seção 1.5, logo, o material possui informações de  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ ,  $G_{12}$ ,  $G_{13}$ ,  $G_{23}$  e  $\nu$ . Os modelos são testados com ensaio de tração (Seção 6.2.1) e flexão (Seção 6.2.2) e seus resultados comparados com o obtido experimentalmente.

As otimizações topológica foram realizadas em 5 casos de estudo para validação metodológica, desta forma foi possível conferir os resultados obtidos com referências de literatura.

O primeiro caso foi definido de acordo com Jankovics et al. (2018), a geometria proposta é uma viga bidimensional, com condição de contorno como engastada e com carga aplicada no eixo de simetria longitudinal (Fig. 6.6).

O segundo caso de estudo foi definido em conforme com a geometria proposta por Meng et al. (2019), esta tem a mesma condição de engaste do estudo 1, entretanto a carga é aplicada na ponta inferior da extremidade livre (Fig. 6.7)

O terceiro caso de estudo foi definido com a geometria apresentada por Liu et al. (2018), esta foi apresentada como uma geometria em L, com a ponta superior engastada e uma carga aplicada no meio da ponta da extremidade livre (Fig. 6.8).

O quarto caso de estudo foi apresentado por [Park e Sutradhar \(2014\)](#), este foi definido como uma viga tridimensional, com condições de contorno engastada e carga aplicada na extremidade livre no eixo de simetria longitudinal (Fig. 6.9). Esta caso de estudo funciona como a tridimensionalização do caso de estudo 1.

O quinto caso de estudo foi definido por [Yang et al. \(2018\)](#) como sendo uma viga tridimensional, com condições de contorno bi-apoiada e carga pontual localizada na metade do comprimento (Fig. 6.10).

Após esta validação foi realizado a prototipagem e teste com o caso de estudo 5, que resulta na ponte otimizada topologicamente (Seção 7.4.3), os resultados experimentais foram comparados com o resultado do modelo numérico isotrópico e ortotrópico.

O painel sanduíche otimizado topologicamente tem sua metodologia de otimização de forma semelhante as utilizadas nos casos de estudo.

Após os testes foi avaliado se os modelos propostos possuem capacidade preditiva do comportamento da estrutura impressa.

## 1.7 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente estudo é dividido em 4 partes principais, estas são os **FUNDAMENTOS TEÓRICOS E ESTADO DA ARTE** com a base teórica necessária para o entendimento, contextualização do estado da arte do tema debatido no estudo; a **FUNDAMENTAÇÃO METODOLÓGICA** com a metodologia do estudo, as normas utilizadas, suas características, detalhamento das técnicas de extensometrias utilizadas e metodologia numérica adotada; **RESULTADOS E DISCUSSÕES** conta com a apresentação dos resultados obtidos e o que esses resultados representam para o estudo e **CONSIDERAÇÕES FINAIS** conta com a conclusão de todo o estudo e quais as perspectivas para estudos futuros.

O Capítulo 2 trata sobre a MA, sua contextualização, seus tipos, características e princípio base.

O Capítulo 3 define o equacionamento básico em relação de materiais anisotrópicos até isotrópicos.

O Capítulo 4 apresenta a contextualização das otimizações topológicas, e por fim informa o básico do método numérico.

O Capítulo 5 aborda as técnicas, normas e maquinários utilizados para fabricação e caracterização de materiais e as técnicas de extensometria utilizadas no presente estudo.

O Capítulo 6 informa a metodologia adotada para realização das simulações, e suas condições de contorno.

O Capítulo 7 mostra as ocorrências do processo de fabricação, os resultados obtidos

para caracterização do material, análise da fratura e exibição dos resultados das simulações de forma comparativa e por fim é feita a avaliação do método numérico para otimizações topológicas.

O Capítulo 8 exibe as conclusões obtidas durante a execução do presente estudo.

O Capítulo 9 abre o leque de opções para as recomendações de pesquisas futuras.

## **Parte I**

# **FUNDAMENTOS TEÓRICOS E ESTADO DA ARTE**

## 2 MANUFATURA ADITIVA PARA POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS

Neste capítulo foi abordado o princípio da manufatura aditiva e seu estado da arte atual. Os tipos de manufatura com enfoque principal na manufatura aditiva para polímeros termoplásticos, nos seus processos e aplicações no setor aeroespacial.

### 2.1 ESTADO DA ARTE

O mercado de polímeros é de grande porte e se torna cada vez maior a cada dia. Em diversas aplicações, os plásticos conseguem substituir materiais como, madeira, metal, cerâmica, e outros materiais tradicionais (STRONG, 2008).

Este mercado no Brasil sofre um crescimento anual, em 2015 foram produzidos cerca de 6,59 Milhões de toneladas de polímeros processados (ABIPLAST, 2016), mesmo com grande variedade de termoplásticos, apenas cinco deles representam cerca de 90% do consumo nacional, os 5 principais são o Polietileno (PE), Polipropileno (PP), Poliestireno (PS), Policloreto de vinila (PVC) e Politereftalato de etileno (PET) (FERREIRA; SANTANA, 2007).

Entretanto os biopolímeros, como Poliacido Láctico (PLA)<sup>1</sup> e Poli(hidroxibutirato) (PHB), obtiveram durante a primeira década deste século um crescimento em média acima de 20% ao ano (PRADELLA, 2006), mas seu consumo ainda não se aproxima dos cinco principais polímeros.

Com o crescimento do uso de polímeros há também o crescimento das tecnologias de processamento destes, uma das principais formas de processar um polímero é através de MA, este é um processo em que máquinas fabricam automaticamente peças, pixel por pixel, camada por camada, de praticamente qualquer material, ao contrário de técnicas de fabricação subtrativas (LUCA, 2017). Lu, Li e Tian (2015) define o processo subtrativo em razão da redução de massa da peça produzida.

A tecnologia de MA surgiu pela primeira vez em meados de 1987 com método de Estereolitografia (SLA)<sup>2</sup> (LUCA, 2017; LU; LI; TIAN, 2015) este tem sua resistência mecânica limitada em razão da viscosidade da resina (STANSBURY; IDACAVAGE, 2016).

Com o passar do tempo essa tecnologia evoluiu de um número limitado de protótipos caros para ferramentas de produção de mercadorias em pequena escala e amplamente dispo-

<sup>1</sup> Como informado na Seção 1.6 um dos polímeros utilizado no presente estudo é o PLA, suas características são abordadas na Seção 2.3.1

<sup>2</sup> Vale ressaltar que este método não faz parte do escopo deste estudo, como explicado na nota de rodapé 3 presente na Seção 2.2.

níveis (LU; LI; TIAN, 2015), logo está cada vez mais popular com a evolução da tecnologia em conjunto com sua redução de custo. Um esquemático da forma de produção de peças com tecnologia SLA é mostrado na Fig. 2.1.

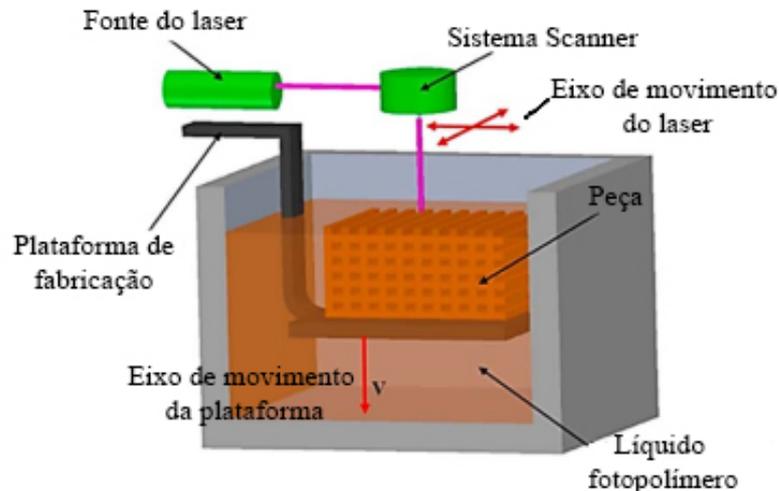


Figura 2.1 – Esquemático do processo da fabricação SLA (Ngo et al. (2018) adaptado).

Luca (2017) destaca que a MA tem vantagens e desvantagens distintas, e cabe ao projetista ou engenheiro decidir se a MA é a melhor opção para o projeto. Sua principal desvantagem é a característica de possuir propriedades mecânicas ruins em determinadas direções, em função do método e padrão de fabricação da peça, como constatado por Linpson (2005).

A MA tem muitas vantagens estratégicas em relação aos processos de fabricação tradicionais: a produção de geometrias complexas de peças internas e externas que não podem ser feitas de qualquer outra forma; iteração rápida através de permutações de design (LUCA, 2017), devido a facilidade de prototipagem.

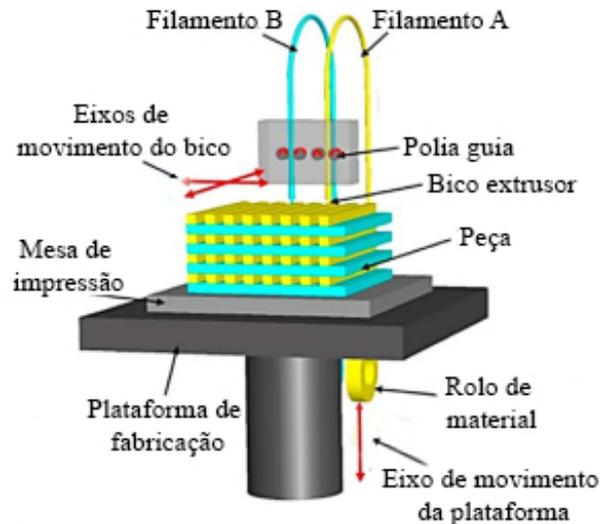
Os processos mais fáceis e populares de MA envolvem a utilização de polímeros, Canevarolo Jr. (2006) define polímeros como uma macromolécula composta por unidades de repetição denominadas meros, com base denominada de monômeros, este é a base para repetição das macromoléculas poliméricas.

Callister (2006) destaca que em sua maioria os polímeros são compostos orgânicos com sua química baseada no carbono, no hidrogênio e em outros elementos não-metálicos, com ligações entre eles.

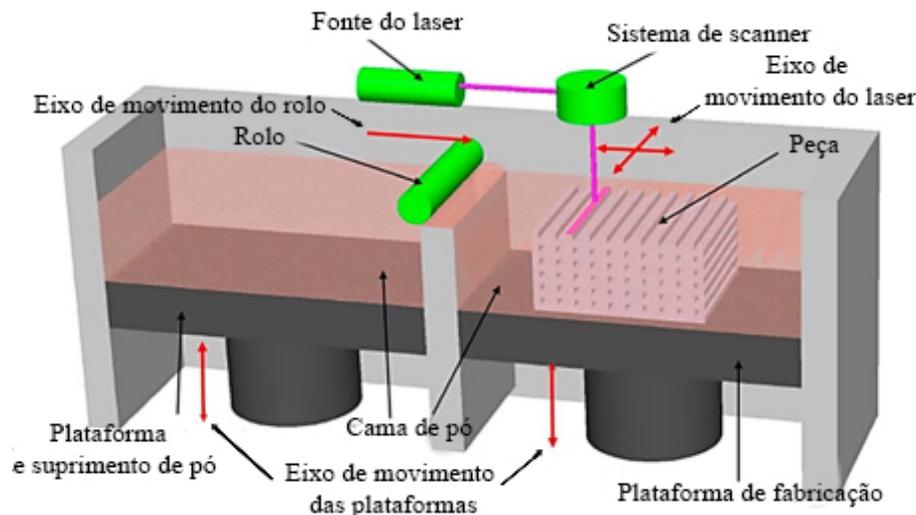
## 2.2 TIPOS DE MANUFATURA ADITIVA

Há vários tipos de manufatura aditiva com diferentes materiais e objetivos, este estudo focou nas formas de fabricação na qual envolvem polímeros termoplásticos (sua definição é apresentada na Seção 2.3) como matéria prima.

Figura 2.2 mostra um esquemático de produção para os principais tipos de MA, vale ressaltar que o método de Sinterização Seletiva a Laser (SLS) e Derretimento Seletivo a Laser (SLM), são diferentes do demonstrado, mas o esquemático é o mesmo para ambos (Fig. 2.2(b)), devido a ambos serem baseados na fusão em cama de pó.



(a) Esquemático para fabricação do tipo FDM.



(b) Esquemático para método de fabricação do tipo fusão em cama de pó.

Figura 2.2 – Esquemático dos principais métodos de fabricação por MA (Ngo et al. (2018) adaptado).

Quadro 2.1 apresenta as principais características do FDM/FFF com polímeros termoplásticos<sup>3</sup>, com a categoria do processo, princípio básico de funcionamento, principais materiais utilizados, aplicações consolidadas e a resolução média alcançada para fabricação das peças.

<sup>3</sup> Há métodos de manufatura aditiva que são utilizados em metais, cerâmicos, ceras e resinas que curam através de luz ultravioleta, entretanto abordar esse tipo de MA foge do escopo deste estudo. Informações extras podem ser encontradas em Killen et al. (2018), Ngo et al. (2018) e Huang et al. (2015).

Quadro 2.1 – Principais características do processo de fabricação FDM/FFF (Killen et al. (2018), Ngo et al. (2018) e Huang et al. (2015) adaptado).

	<b>Modelagem por Deposição Fundida (FDM) e Fabricação de Filamentos Fundidos (FFF)</b>
<b>Categoria</b>	Extrusão de material
<b>Princípio</b>	Material derretido é precisamente posicionado camada por camada
<b>Material</b>	Polímeros Termoplásticos e cerâmicos
<b>Aplicações</b>	Modelos conceituais e protótipos de teste <sup>4</sup> .
<b>Resolução</b>	50-200 $\mu$ m

## 2.3 MODELAGEM POR DEPOSIÇÃO FUNDIDA

O tipo de FDM abordado no presente estudo utiliza de polímeros termoplásticos, [Canevarolo Jr. \(2006\)](#) define um polímero termoplástico como o que apresenta a capacidade de amolecer e fluir se sujeito à aumento de temperatura. Ao retornar a temperatura inicial, o polímero solidifica-se em um produto com formas definidas.

Desta forma é possível fabricar filamentos poliméricos para utilizar em montagens de peças, para isso é usado um maquinário denominado extrusora. [Wernke, Sousa e Barcelos Jr. \(2018\)](#) cita um projeto de baixo custo com maquinário comum para construção de uma extrusora que utiliza do método FFF, este tem a finalidade de fabricar filamentos para impressão 3D para uso em PR.

Muitas vezes a impressão 3D é denominada como prototipagem rápida, com o termo "prototipagem" referente ao processo como muito lento para uso em produção em massa. E a palavra "rápida" relacionada à facilidade de fazer um modelo físico de um objeto ([BERMAN, 2012](#)), logo não há relação de termos com a definição de protótipo comumente utilizada na engenharia.

Impressão 3D é uma tecnologia que começou no início dos anos 1990 ([STANSBURY; IDACAVAGE, 2016](#)), este é um tipo de MA na qual é mais comumente difundido pelo método de FDM capaz de fabricar peças 3D complexas com base em dados CAD, sem moldes ou ferramentas caras ([MATSUZAKI et al., 2016](#)), para isso é utilizado de técnicas na qual é empregado um processo de manufatura em que os produtos são construídos camada por camada, através de uma série de fatias transversais, paralelas a mesa de impressão ([BERMAN, 2012](#)).

Para iniciar essa produção é feito um modelo tridimensional em CAD, no qual é então exportado no formato *Standard Tessellating Language* (STL) para o software responsável pelo fatiamento ([AHN et al., 2002](#)), este software tem a tarefa de dividir o arquivo em fatias paralelas a mesa de impressão, para que desta forma esta seja impressa. Este processo é mostrado no esquemático da Fig. 2.3

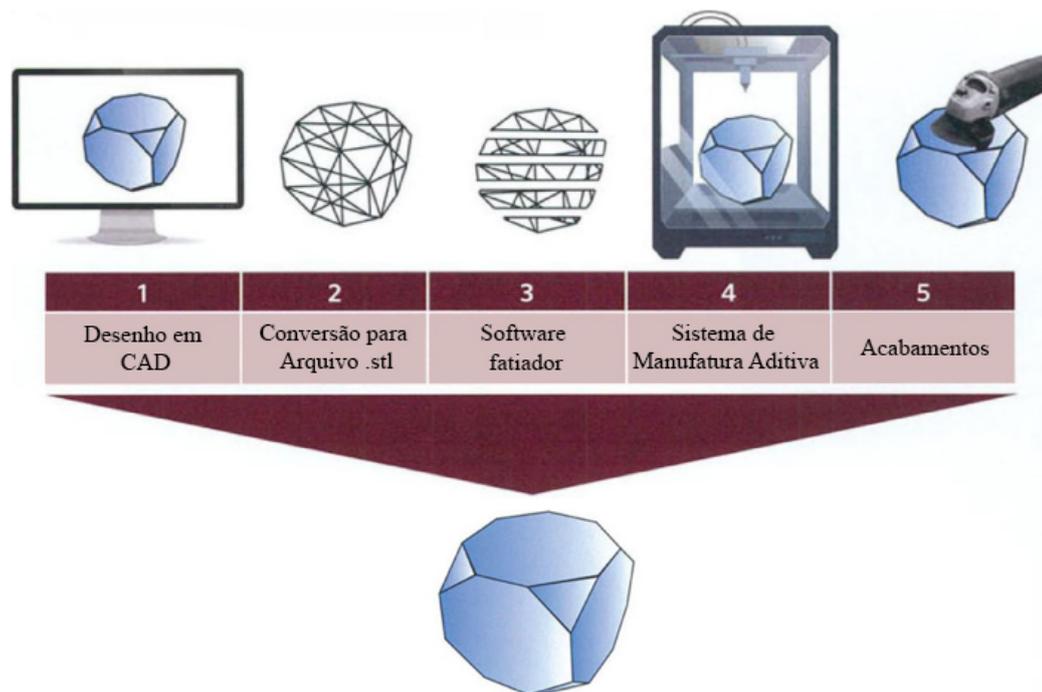


Figura 2.3 – Esquemático com a ordem de todo o processo para impressão 3D (Dizon et al. (2018) adaptado).

Ahn et al. (2002) estudou o processo de fabricação com foco a anisotropia causada pela impressão 3D, efeitos dos diferentes formas de preenchimento e os efeitos de concentradores de tensão causado pela fabricação da peça. Como principal resultado é montado as chamadas regras de construção, estas são:

1. A manufatura da peça deve ser feita de tal forma que as cargas de tração sejam transportadas axialmente ao longo das fibras, sem cargas perpendiculares as camadas de impressão;
2. Há indícios que as concentrações de tensão ocorrem mesmo em cantos arredondados. Isso ocorre em alguns casos porque os cordões de impressão exibem descontinuidades em tais transições;
3. Um *airgap* negativo (Fig. 2.7) pode aumentar a força e a rigidez da peça produzida.
4. Para aplicações avançadas com baixos coeficientes de segurança deve ser considerado o efeito anisotrópico na construção da orientação das peças.

Ao utilizar este método é necessário entender suas vantagens e desvantagens, desta forma o Quadro 2.2 mostra as principais vantagens, aplicações e limitações do processo de fabricação com impressoras 3D.

Quadro 2.2 – Principais características da impressão 3D (Berman (2012) e Ngo et al. (2018) adaptado).

<p><b>Vantagens</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pode construir economicamente produtos personalizados em pequenas quantidades;</li> <li>• Não há necessidade de ferramentas caras;</li> <li>• Uso de suprimentos prontamente disponíveis de fácil aquisição;</li> <li>• Capacidade de reciclar material residual das impressões, como suportes de impressão, impressões erradas e testes de impressão;</li> <li>• Capacidade de compartilhar facilmente projetos e terceirizar a fabricação, com um mercado que age sob demanda;</li> <li>• Velocidade e facilidade de projetar e modificar peças.</li> <li>• fabricação de geometrias complexas com precisão em conjunto com máxima economia de material, e flexibilidade na geometria.</li> </ul>
<p><b>Aplicações</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Protótipos;</li> <li>• Peças de reposição;</li> <li>• Componente estruturais secundários;</li> <li>• Produtos personalizados.</li> </ul>
<p><b>Limitações</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Custos mais altos para produção em larga escala se comparado à moldagem por injeção e outras tecnologias semelhantes;</li> <li>• Escolha reduzida de materiais, cores e acabamentos superficial;</li> <li>• Resolução menor em relação a outras tecnologias, como demonstrado no Quadro 2.1;</li> <li>• Resistência mecânica limitada, normalmente apresenta baixa resistência ao calor e problemas em ambiente com umidade.</li> </ul>

Vale ressaltar que estimativas apontam que 20% das peças produzidas são produtos finais e não apenas protótipos, este número tende a aumentar para 50% até o ano de 2020 (KILLEN et al., 2018).

As peças fabricadas por impressão 3D podem sofrer de várias influências, algumas des-

sas influências são descritas abaixo.

- Empenamento: pode ocorrer durante o resfriamento do material após a deposição, neste momento ocorre a deformação e desalinhamento que é especialmente perceptível em superfícies planas (LIMPSON, 2005), este efeito é causado devido ao gradiente de temperatura durante a extrusão do material na mesa de impressão (TURNER; GOLD, 2015);
- Padrão de deposição: Os processos de deposição de material é realizado camada por camada, isso faz com que o comportamento mecânico do material se aproxime de um composto reforçado por fibras devido a propriedades ortotrópicas (LIMPSON, 2005), esta é debatida na Seção 3.2 (aborda a temática de ISOTROPIA, ORTOTROPIA E ANISOTROPIA). Um esquemático de preenchimento típico é mostrado na Fig. 2.4;

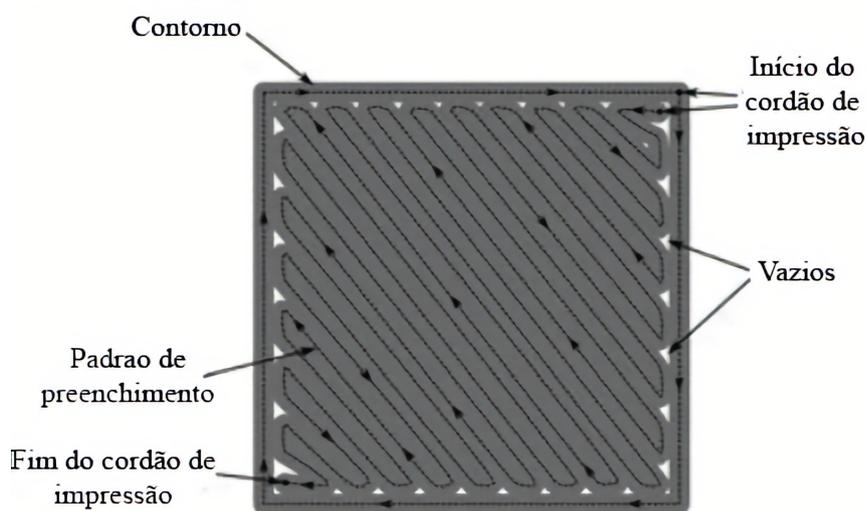


Figura 2.4 – Esquemático de um padrão de preenchimento típico (Turner e Gold (2015) adaptado).

- A velocidade de impressão e a qualidade de uma peça (precisão da forma, rugosidade, tensão interna, etc.) normalmente apresentam uma relação inversa (LU; LI; TIAN, 2015), juntamente a isso deve ser considerado a velocidade de movimentação da cabeça de impressão, esta altera o formato do cordão de impressão resultante (TURNER; GOLD, 2015), este efeito é mostrado na Fig. 2.5.

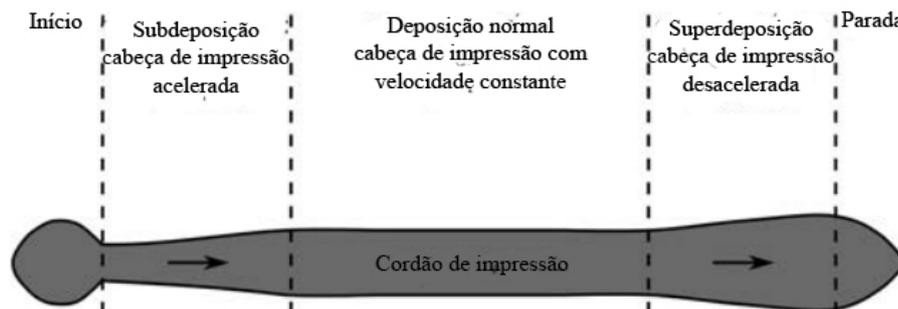


Figura 2.5 – Esquemático com o efeito da velocidade de movimentação da cabeça de impressão no cordão de impressão (TURNER e GOLD (2015) adaptado).

- A resolução do arquivo ".stl" altera a precisão e qualidade de uma peça, principalmente caso essa peça apresenta paredes curvas e superfícies complexas (TURNER; GOLD, 2015), isto é mostrado na Fig. 2.6.

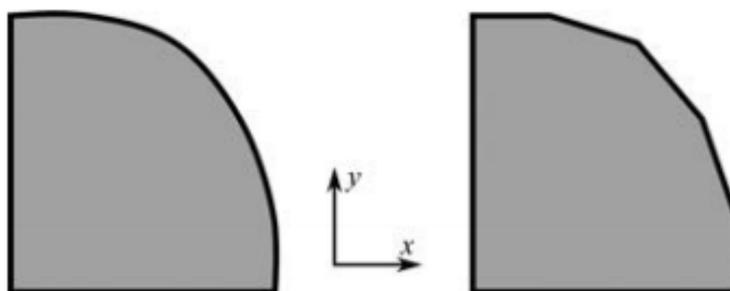


Figura 2.6 – Esquemático demonstrativo da diferença de resolução, com esquerda stl com maior resolução e direita com menor resolução (TURNER; GOLD, 2015).

- Os chamados *airgaps* alteram a acuracidade dimensional do processo de fabricação e em muitos casos sua resistência mecânica (TURNER; GOLD, 2015), este efeito é mostrado no esquemático disponível na Fig. 2.7.

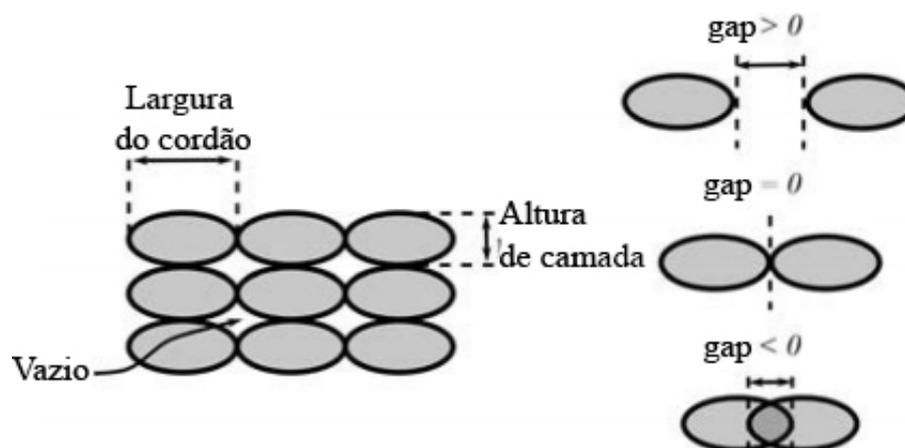


Figura 2.7 – Esquemático demonstrativo dos *airgaps* para diferentes calibrações de impressão (Turner e Gold (2015) adaptado).

- Fatores externos, como temperatura ambiente, umidade e poeira podem alterar tanto a qualidade do filamento, quanto das peças impressas (NGO et al., 2018).

### 2.3.1 Principais materiais

Hoje em dia é possível utilizar uma ampla gama de materiais como matéria prima para as peças fabricadas por impressora 3D, estes materiais incluem os plásticos, metais, cerâmicas, madeiras, materiais comestíveis, fibras elétricas, materiais magnéticos e grafeno (LU; LI; TIAN, 2015).

Vale lembrar que o presente estudo foca no processo para polímeros, logo, os principais polímeros utilizados com impressoras 3D são o Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), PLA e PETG, mas vale ressaltar que existe Nylon, materiais flexíveis e materiais solúveis, como Acetato de Polivinila (PVA) e Poliestireno de alto impacto (HIPS) que encontram constante crescimento em sua utilização.

Este estudo concentrou-se em aplicações que utilizam o PLA como material principal das peças otimizadas e não otimizadas.

#### Poliácido Láctico (PLA)

O PLA é um termoplástico rígido (em temperatura ambiente) produzido em larga escala a partir do ácido láctico gerado pela fermentação de produtos naturais ricos em carboidratos (FE-CHINE, 2013), possui biocompatibilidade e biodegradabilidade (FARRINGTON et al., 2005).

Diferente do ABS, o PLA não libera gases tóxicos durante a impressão, é adequado para velocidades rápidas de impressão e possui menor temperatura de fusão, além de ser produzido a partir de fontes naturais, com insumos como arroz, milho e outras fontes renováveis que são utilizados na síntese química do ácido láctico (FARRINGTON et al., 2005).

Além disso, pode ser reciclado, devido à policondensação reversível e pode ser despolimerizado por hidrólise, com melhor gerenciamento de resíduos no processo de produção (FARRINGTON et al., 2005; ALVES et al., 2016).

O PLA é tipificado como um polímero semicristalino ou amorfo, suas fibras têm seção transversal aproximadamente circular e superfície lisa, boa resistência aos UV (não absorvem a luz da região visível do espectro), boa resistência química, densidade de  $1,24\text{g/cm}^3$  (inferior às fibras naturais), ponto de transição vítrea entre  $55^\circ\text{C}$  e  $65^\circ\text{C}$ , ponto de fusão entre  $160^\circ\text{C}$  e  $170^\circ\text{C}$ , tenacidade de ruptura de  $32\text{cN/tex}$  a  $36\text{cN/tex}$  (FARRINGTON et al., 2005).

## 2.4 STANDARD TESSELLATING LANGUAGE

STL é um formato focado inicialmente para impressão em plástico 3D. Geralmente é incluído como uma opção de exportação sem uso de licenças adicionais no software CAD, considerado a capacidade de importar para códigos de impressão 3D como procedimento padrão (HÄLLREN; PEJRYD; EKENGREN, 2016).

Atualmente os arquivos no formato STL são usados na maioria dos processos de MA, este se aproxima da forma 3D como uma série de triângulos, cujo tamanho coloca um limite fundamental na resolução que pode ser alcançado na peça final (TURNER; GOLD, 2015). Este efeito é demonstrado na Fig. 2.8.

Esta é sua principal desvantagem, porque são usados apenas triângulos, e não equacionamentos que fazem a completa descrição como em arquivos no formato STEP. No entanto, os argumentos introduzidos por essas aproximações são aceitáveis desde que sejam inferiores à inexactidão inerente ao processo de fabricação (AHN et al., 2002).

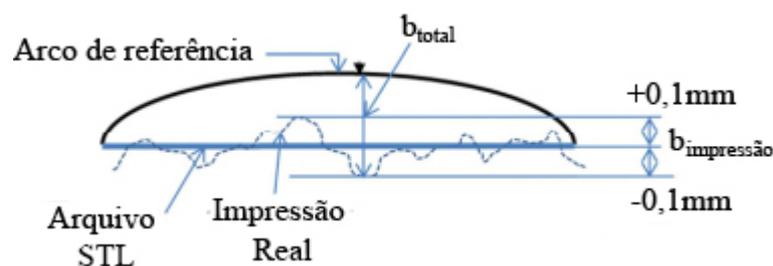


Figura 2.8 – Esquemático demonstrativo do erro proveniente da tesselação (Hällren, Pejryd e Ekengren (2016) adaptado).

Um exemplo de como funciona a tesselação realizada na conversão do arquivo CAD para STL é mostrado na Fig. 2.9, nesta figura temos um domínio circular discretizado por triângulos, a partir destes triângulos é possível definir o nível de precisão da impressão.

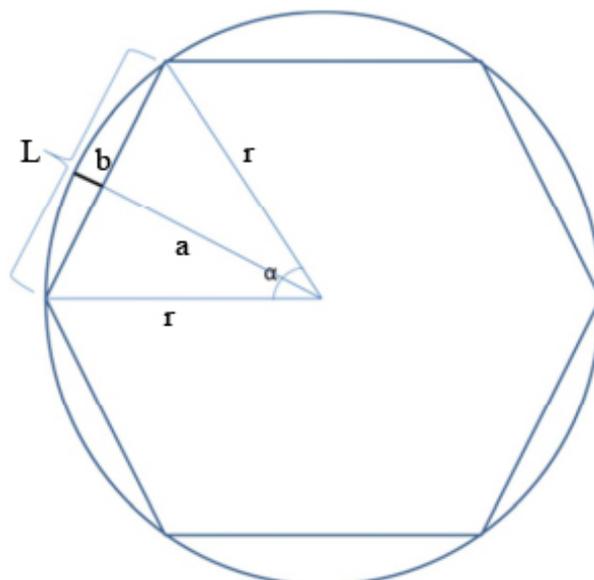


Figura 2.9 – Esquemático com exemplo de como funciona a tesselação (HÄLLren, Pejryd e Eken-gren (2016) adaptado).

Há três principais parâmetros nessa modelagem,  $r$  e  $L$  as dimensões do triângulo de discretização, no qual é denominado de *Step* nos softwares CAD.

E  $b$  no qual define a distância entre o elemento triangular e a verdadeira forma, no qual é adimensionalizado e recebe denominação de *Sag* nos softwares CAD. Este é o principal parâmetro para definir a fidelidade de uma impressão ao modelo CAD. Estas variáveis são interligadas pela Eq. 2.1 (HÄLLREN; PEJRYD; EKENGREN, 2016).

$$b = r \left( 1 - \cos \left( \sin^{-1} \frac{L}{2r} \right) \right) \quad (2.1)$$

Desta forma pode-se obter o valor da aproximação da peça projetada a partir do tamanho do elemento utilizado para discretização.

## 2.5 APLICAÇÕES AEROESPACIAIS DA IMPRESSÃO 3D

A impressão 3D deverá revolucionar a fabricação de componentes. Enquanto vários sistemas de impressão 3D estão disponíveis, com diferentes características e aplicações (MATSUZAKI et al., 2016).

Aplicações com impressora 3D vão desde os mais simples até os mais complexos casos de engenharia, por exemplo a fabricante de motores a jato GE® projetou um bocal de jato de um motor de aeronave no qual obteve uma redução de 15% na taxa de combustível (LU; LI; TIAN, 2015).

Este representa a próxima geração de componentes de motores a jato caracterizados por geometrias complexas para melhores caminhos e suportes de resfriamento, desta forma seu projeto e realização é devido em parte à componentes feitos por impressão 3D (LU; LI; TIAN, 2015).

Em consequência a vida útil foi incrementada em cinco vezes em conjunto com a redução do número de peças necessárias de 18 para 1, e a massa foi reduzida em 25% (NGO et al., 2018).

A impressão baseada em FDM com termoplásticos é particularmente difundida devido à simplicidade e potencial da aplicabilidade do método (MATSUZAKI et al., 2016).

O projeto LAICAnSat e a missão Kuaray demonstram uma aplicabilidade à nível de engenharia para esses materiais e métodos da tecnologia FDM. LAICAnSat é um projeto desenvolvido pelo Laboratório para Aplicação e Inovação em Ciências Aeroespaciais (LAICA) que consiste numa plataforma para a realização de experiências científicas e tecnológicas na atmosfera (ALVES et al., 2016).

Este é transportado através de um balão para uma altitude entre 10 a 30km (ALVES et al., 2016; WERNKE et al., 2018; BORGES et al., 2018), um esquemático do projeto é mostrado na Fig. 2.10.

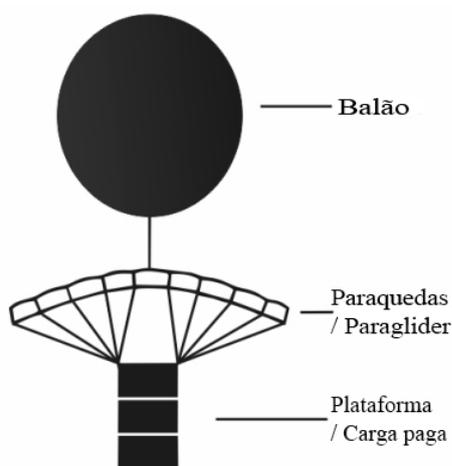


Figura 2.10 – Esquemático do projeto LAICAnSat (Alves et al. (2016) adaptado).

A missão Kuaray é um desenvolvido do LAICAnSat, este foi realizado em parceria entre a Universidade de Brasília e o Clube de Astronomia de Brasília (CAsB), com a missão de gravar em 360° o eclipse solar que ocorreu em 21 de Agosto de 2017, em Idaho, EUA (WERNKE et al., 2018; BORGES et al., 2018).

Para realizar essa gravação foi realizado uma cooperação com a universidade do estado de Montana, EUA, desta forma a UnB teve participação no NASA *Space Grant Eclipse Ballooning Project* (WERNKE et al., 2018; BORGES et al., 2018). Fig. 2.11 mostra trechos da gravação de momentos antes e durante o eclipse.

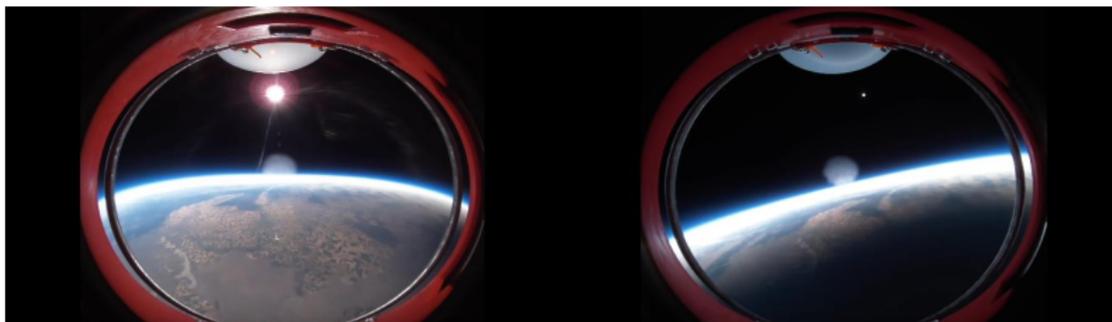
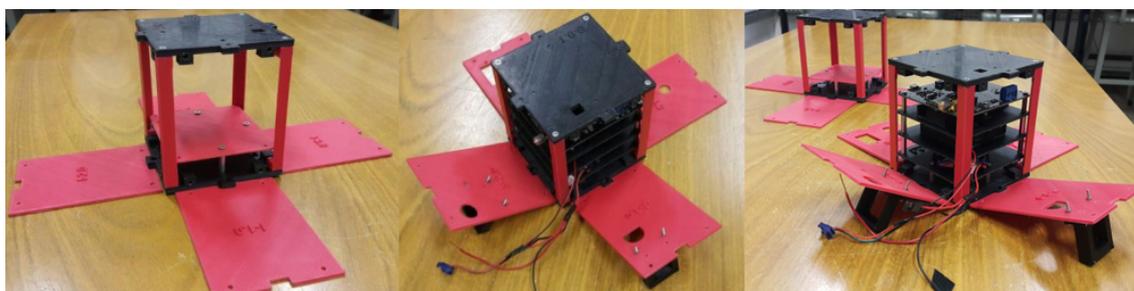


Figura 2.11 – Imagens da gravação do eclipse momentos antes (esquerda) e durante sua totalidade (direita) (WERNKE et al., 2018).

Ambas as estruturas do projeto LAICAnSat e do projeto Kuaray seguem o padrão 3U CubeSat (ALVES et al., 2016; WERNKE et al., 2018; BORGES et al., 2018). A estrutura projetada foi feita através de impressora 3D do tipo FDM, com material PLA.

A Fig. 2.12(a) mostra o resultado impresso das ultimas estruturas (a que realizou a missão Kuaray e testes de voo prévio) e Fig. 2.12(b) mostra a integração da estrutura com os componentes eletrônicos e Fig. 2.12(c) mostra a montagem final de preparação para voo.



(a) Estrutura impressa para missão Kuaray (adaptado Wernke et al. (2018), Borges et al. (2018)).



(b) Integração entre estrutura e eletrônica para missão Kuaray (BORGES et al., 2018). (c) Estrutura e eletrônica integrada para missão Kuaray (WERNKE et al., 2018).

Figura 2.12 – Estrutura impressa e integrada com eletrônica para missão Kuaray.

Baseado nestes exemplos é possível notar que as impressoras 3D independentemente do material conseguem oferecer versatilidade e facilidade na manufatura, o que agrega ao projeto estrutural aeroespacial.

## 3 MECÂNICA ESTRUTURAL

Este capítulo realizou um paralelo entre materiais impressos e materiais compósitos, no qual destaca as definições de micro e macro mecânica, com direcionamento para utilização da macromecânica na qual é comumente utilizada em materiais compósitos.

As definições das constantes de engenharia para materiais são apresentadas e utilizadas de forma a equacionar a relação matricial entre tensão e deformação de um material ortotrópico até a simplificação de um material isotrópico.

### 3.1 MICROMECAÂNICA E MACROMECAÂNICA

Micro e macro mecânica estão diretamente ligados com materiais compósitos. Na análise micromecânica é a consideração de que o material não é homogêneo, mas sim formado por diferentes fases (matriz e reforço), com estas composições determinantes de suas características (OLIVEIRA, 2018).

Há diversos modelos micromecânicos, uma definição básica é apresentada pela regra das misturas, este modelo utiliza-se das propriedades de cada material (matriz e reforço) e suas frações em volume (OLIVEIRA, 2018; CALLISTER, 2006), para desta forma estimar as propriedades finais do material compósito.

Entretanto este modelo não leva em consideração característica como o módulo de cisalhamento com seu comportamento real com características voltadas à não linearidade, não considera a falta de aderência entre matriz e fibra e a distribuição das tensões entre matriz e fibra são diferentes (OLIVEIRA, 2018).

Desta forma é necessário utilizar algum outro modelo para determinar de forma mais precisa as propriedades ortotrópicas (debatidas na Seção 3.2). Alguns métodos que podem prever as características ortotrópicas são Spencer (1986) e o modelo de Halpin (1969), de acordo com Oliveira (2018) estes métodos são mais utilizados em projetos de engenharia do que a regra das misturas, entretanto essa abordagem ortotrópica complexa não faz parte do escopo deste estudo.

Daniel e Ishai (2006) define a macromecânica de um material compósito como a análise, onde o material é tratado como quase homogêneo, mas tem sua anisotropia aproveitada, desta forma pode ser trabalhado para garantir melhores propriedades para direções de interesse.

Figura 3.1 demonstra o comparativo entre micromecânica e macromecânica.

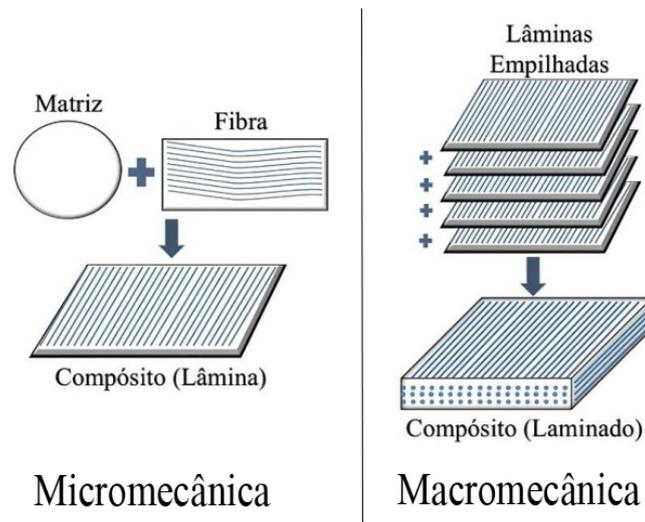


Figura 3.1 – Comparativo entre micromecânica (esquerda) e macromecânica (direita) (Oliveira (2018) adaptado).

## 3.2 ISOTROPIA, ORTOTROPIA E ANISOTROPIA

Normalmente, materiais compósitos reforçados por fibras podem sofrer uma organização das fibras de forma a ter comportamento anisotrópico, em outras palavras, as propriedades dependem da direção das fibras. Em geral, duas ou mais folhas deste material é posicionada juntas para que a direção das fibras coincida com a direção das cargas principais (MEGSON, 2010), desta forma é gerado uma organização macromecânica das propriedades (3.1).

Peças fabricadas através de impressão 3D passam pelo processos de deposição em camadas desta forma seu comportamento mecânico aproxima de um material compósito reforçado por fibras, como o supracitado. Assim, as propriedades do material se tornam largamente dependentes da orientação de impressão da peça, do padrão de deposição das camadas (LIMPSON, 2005) e da porcentagem de preenchimento.

O Quadro 3.1 mostra o número de constantes elásticas em função do grau de anisotropia do material, esta tabela também ressalta as constantes de engenharia para as situações mais usuais em projeto de materiais compósitos.

Quadro 3.1 – Número das constantes elásticas para materiais com diferentes graus de anisotropia e as constantes de engenharia usuais (Silva (2005) adaptado).

Material	Constantes independentes	
	N.º de constantes elásticas	Constantes de engenharia
Especialmente ortotrópico (2 planos de simetria paralelo à direção da fibra)	9	$E_1, E_2, E_3, \nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}, G_{12}, G_{13}$ e $G_{23}$
Ortotrópico, transversalmente isotrópico	5	$E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{23}$ e $G_{12}$
Ortotrópico, transversalmente isotrópico, no estado plano de tensões	4	$E_1, E_2, \nu_{12}$ e $G_{12}$
Isotrópico	2	$E$ e $\nu$

O material impresso apresenta anisotropia devido seu método de fabricação orientar fibras em determinada direção, isto é um reflexo da sua microestrutura (NGO et al., 2018) com interferência em sua organização macromecânica.

Entretanto, a diferença entre propriedades anisotrópicas é de no máximo 20%, este representa uma diferença entre módulo de elasticidade em flexão e módulo de elasticidade em tração de aproximadamente 15%, essa diferença máxima é obtida em razão do sentido de impressão e da conexão entre camadas. (DIZON et al., 2018).

Estudos como o proposto por Zou et al. (2016) obtém experimentalmente uma diferença entre as propriedades direcionais inferiores a 2%, isto corrobora com consideração de material isotrópico o que permite fazer aproximações através de modelos que consideram o material homogêneo e isotrópico. Vale destacar que Zou et al. (2016) realiza ensaios exclusivamente para carga direcionado em tração.

### 3.3 ELASTICIDADE DA ORTOTROPIA À ISOTRPIA

A tensão-deformação de uma material pode ser relacionada através da Eq. 3.1 (SILVA, 2005; OLIVEIRA, 2018).

$$\epsilon_i = S_{ij} \sigma_j \quad (3.1)$$

Com  $\epsilon_i$  sendo a deformação resultante,  $S_{ij}$  a matriz de flexibilidade e  $\sigma_j$  a tensão atuante.

Uma consideração refinada para materiais impressos é feita pela consideração de material transversalmente isotrópicos (ZOU et al., 2016), desta forma podemos escrever a Eq. 3.1 para um material transversalmente isotrópico este é mostrado na forma matricial na Eq. 3.2 (SILVA,

2005; OLIVEIRA, 2018; CHEN; SALEEB, 1994).

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(S_{22} - S_{23}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.2)$$

Sendo  $\epsilon_n$  a deformação normal,  $\gamma_{nm}$  deformação angular,  $\sigma_n$  tensão normal e  $\tau_{nm}$  tensão cisalhante.

A Eq. 3.2 pode ser reescrita com as constantes de engenharia demonstradas no Quadro 3.1, desta forma é obtido o mostrado na Eq. 3.3 (SILVA, 2005; OLIVEIRA, 2018; CHEN; SALEEB, 1994).

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{12}}{E_2} & \frac{-\nu_{12}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & \frac{-\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{-\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_{23})}{E_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.3)$$

A matriz multiplicadora da tensão denominada como a matriz constitutiva material, esta recebe a denominação de  $D$  (SUAREZ, 2016). Como o debatido na Seção 3.2 o material impresso pode ser simplificado a um material isotrópico, desta forma podemos escrever a Eq. 3.3 com  $E_1 = E_2 = E$ ,  $\nu_{12} = \nu_{23} = \nu$  e  $G_{12} = G$  ( $G$  é definido em função de  $E$  e  $\nu$ , Eq. 3.4b), este resultado é mostrado na Eq. 3.4a.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu}{E} & \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu)}{E} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.4a)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (3.4b)$$

Quadro 3.2 mostra as relações entre módulo de elasticidade, módulo de cisalhamento, razão de Poisson e módulo de bulk. Desta forma com um par de variáveis é possível obter as demais variáveis.

Quadro 3.2 – Relação entre constantes de engenharia (Chen e Saleeb (1994), adaptado).

Variáveis conhecidas	Módulo de cisalhamento $G$	Módulo de elasticidade $E$	Módulo de bulk $K$	Coefficiente de Poisson $\nu$
$E, \nu$	$\frac{E}{2(1 + \nu)}$	$E$	$\frac{E}{3(1 - 2\nu)}$	$\nu$

Para o caso de um corpo de prova em carregamento uniaxial, carregamento em tração semelhante ao debatido na Seção 5.3.1, podemos definir  $\epsilon$  pela Eq.3.5a,  $\sigma$  pela Eq. 3.5b e  $\nu$  pela Eq. 3.5c (BEER et al., 2008).

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_o} \quad (3.5a)$$

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.5b)$$

$$\nu = -\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} = -\frac{\epsilon_3}{\epsilon_1} \quad (3.5c)$$

Sendo  $L_o$  o comprimento inicial do espécime,  $\Delta L$  a variação em comprimento,  $P$  carga aplicada e  $A$  área da seção transversal.

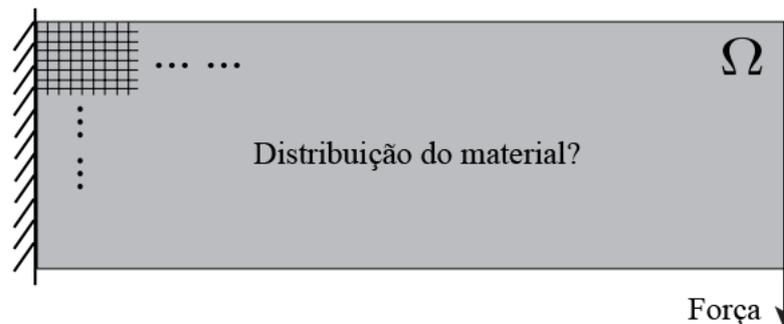


a fabricação através de processos tradicionais, o que limita ainda mais aplicações em engenharia.

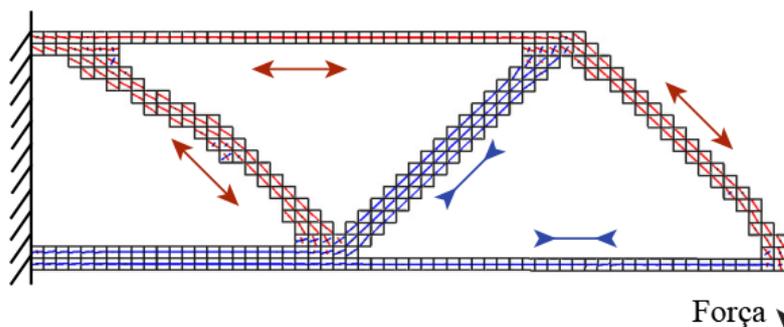
Devido a estas geometrias complexas o modelo ideal de otimização muitas vezes só podem ser fabricados com impressoras 3D, estes são utilizadas em vários pontos da engenharia, por exemplo, na indústria aeroespacial, a impressora 3D tem sido usada para fabricar peças estruturais flexíveis de grande porte e peças de sustentação com formas complexas e baixa fração de volume. Essa tecnologia também pode ser usada para fabricar peças de precisão em motores aeroespaciais e seus controladores (LU; LI; TIAN, 2015).

O exemplo esquemático de OT é mostrado na Fig. 4.2, este tem por base otimizar o domínio  $\Omega$  com redução da massa e maximização da rigidez (minimização da *compliance*).

Na Fig. 4.6(a) mostra caso inicial antes da OT, com o levantamento de qual a distribuição ideal de material e Fig. 4.6(b) para pós OT já com a geometria ideal, vale ressaltar que a geometria é otimizada de forma a resistir em partes a compressão (azul) e partes a tração (vermelho).



(a) Distribuição de material antes da OT.



(b) Distribuição de material depois da OT.

Figura 4.2 – Esquemático do funcionamento da otimização topológica (Meng et al. (2019) adaptado).

## 4.2 PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

O método focado neste estudo é definido como uma aproximação através de lei de potência, também denominado como *Solid Isotropic Material with Penalization* (SIMP), este funciona com sistema de pseudo-densidade, no qual o elemento discretizado com esta pseudo-densidade

serve como ponto de projeto da otimização topológica (BENDSOE; SIGMUND, 2003). Esta definição é expressa através da Eq. 4.1.

$$E(\rho) = \rho^p E_0 \quad (4.1)$$

Com  $E(\rho)$  definido como o pseudo-módulo de elasticidade do material,  $\rho$  a densidade do material,  $p$  é a potência de penalização<sup>1</sup> e  $E_0$  o módulo de elasticidade original do material.

A potência de penalização atua na mudança da contribuição de elementos com densidades intermediárias para a rigidez total, obtendo a relação mostrada na Fig. 4.3.

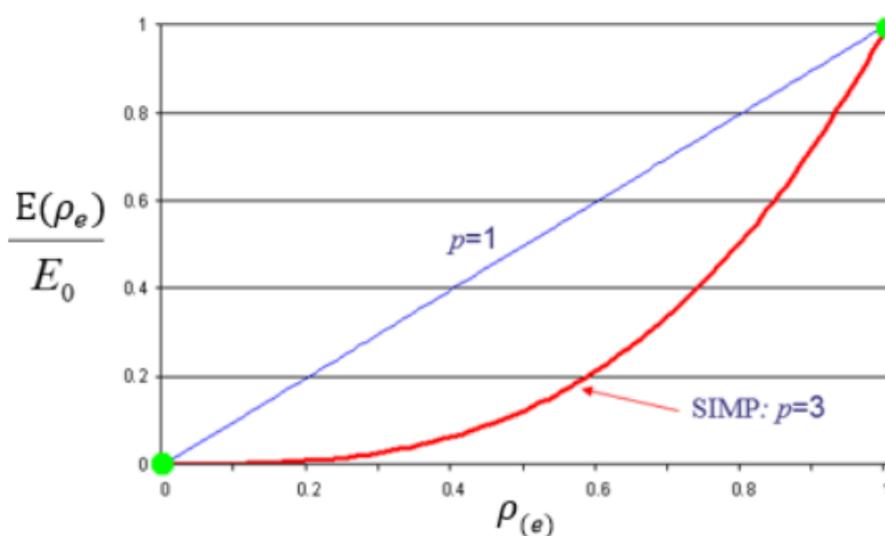


Figura 4.3 – Pseudo-módulo de elasticidade em função do fator de penalização (Dassault Systèmes (2019), adaptado).

A Eq. 4.2a é o equacionamento base para problema de otimização de topologia baseado na abordagem da lei de potência (SIMP), definido como o domínio discretizado, em que o objetivo é minimizar a *compliance*, logo maximizar a rigidez sujeito as condições da Eq. 4.2b (SIGMUND, 2001; MENG et al., 2019; JANKOVICS et al., 2018).

<sup>1</sup> Vários autores como Sigmund (2001), Bendsoe e Sigmund (2003), Meng et al. (2019) definem este valor como 3 para a maioria das aplicações.

$$C(\rho) = \mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U} = \sum_{e=1}^N (\rho_e)^p \mathbf{e}_e^T \mathbf{k}_e \mathbf{u}_e \quad (4.2a)$$

$$\frac{V(\rho)}{V_0} = f$$

$$\mathbf{K} \mathbf{U} = \mathbf{F} \quad (4.2b)$$

$$0 < \rho_{min} \leq \rho \leq 1$$

Com  $\mathbf{U}$  e  $\mathbf{K}$ , as matrizes globais de deslocamento e rigidez respectivamente,  $N$  o total de elementos,  $\rho_e$  é a propriedade a ser otimizada em cada elemento,  $\mathbf{u}_e$  é a matriz deslocamento para cada elemento,  $\mathbf{k}_e$  é a matriz de rigidez para cada elemento,  $V(x)$  o volume do material,  $V_0$  o volume do domínio sob condições de projeto,  $f$  é a fração volumétrica,  $\mathbf{F}$  como matriz dos vetores,  $\rho_{min}$  é a propriedade à ser minimizada, no caso deste estudo, a densidade.

A matriz de rigidez para cada elementos dentro do domínio  $\Omega$  pode ser obtido pela Eq. 4.3. Nesta equação  $\mathbf{B}$  é a matriz de tensão-deslocamento e  $\mathbf{D}$  é definido como a matriz constitutiva (JANKOVICS et al., 2018; SUAREZ, 2016).

$$k_e = \int_{\Omega_e} \mathbf{B}_e^T \mathbf{D}_e \mathbf{B}_e d\Omega \quad (4.3)$$

### 4.2.1 Modelo numérico

As otimizações topológicas são em sua maioria dos casos conduzidas em domínios discretizados no qual conta com a necessidade de soluções numéricas. A base das simulações numéricas é a discretização do domínio simulado, Fig. 4.4 mostra os tipos de malhas 3D utilizados neste estudo.

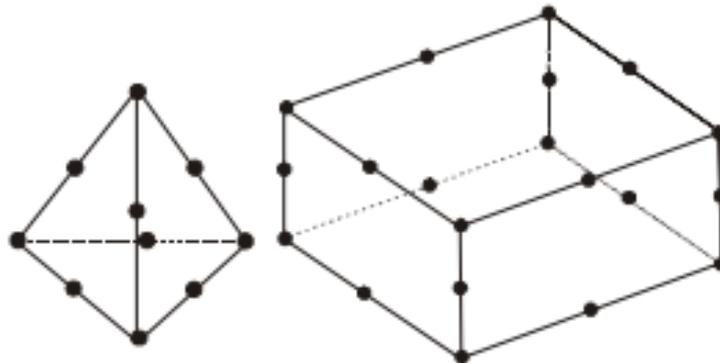


Figura 4.4 – Tipos de malha utilizado no presente estudo (Seshu (2003), adaptado).

O equacionamento básico dos elementos finitos é mostrado na Eq. 4.4 (ZIENKIEWICZA; TAYLOR; ZHU, 2013).

$$r = Ku - f \quad (4.4)$$

Com  $r$  representante das forças atuantes em cada nó,  $u$  os deslocamentos destes nós,  $f$  as forças necessárias para equilíbrio e  $K$  é a matriz de rigidez.

Uma forma de minimizar os erros numéricos é utilizar de melhorias da discretização da malha, estes refinamentos podem ser separados como refino do tipo p e tipo h.

O refino tipo p é aumento da ordem polinomial das funções de interpolação em cada elemento. O refino p é adequado a problemas em que a solução analítica não possui pontos de singularidade (NOVOTNY; FANCELLO, 1998)

O refino h consiste no aumento do número de elementos. Este refino é adequado aos casos em que a solução não é suave em todo domínio (NOVOTNY; FANCELLO, 1998).

O refino do tipo p auxilia a convergência da solução, entretanto é agregado um maior custo computacional, este efeito é observado por Wernke et al. (2016).

Entretanto o método SIMP comum não permite a utilização de elementos não lineares na sua discretização, desta forma o único refino possível com OT feita através de SIMP é do tipo h.

### 4.3 APLICAÇÕES AEROESPACIAIS

O *design* do *Droop Nose Ribs* do A380 é a aplicação mais popular de OT na aviação atual, este foi realizado como projeto de um conjunto de nervuras para o nariz do A380, este é exibido na Fig. 4.5. Inicialmente foi otimizado via OT com foco minimizar a *compliance*, depois este resultado foi trabalho para garantir mais estabilidade, atender critérios de tensão e flambagem local da flange (MENG et al., 2019).

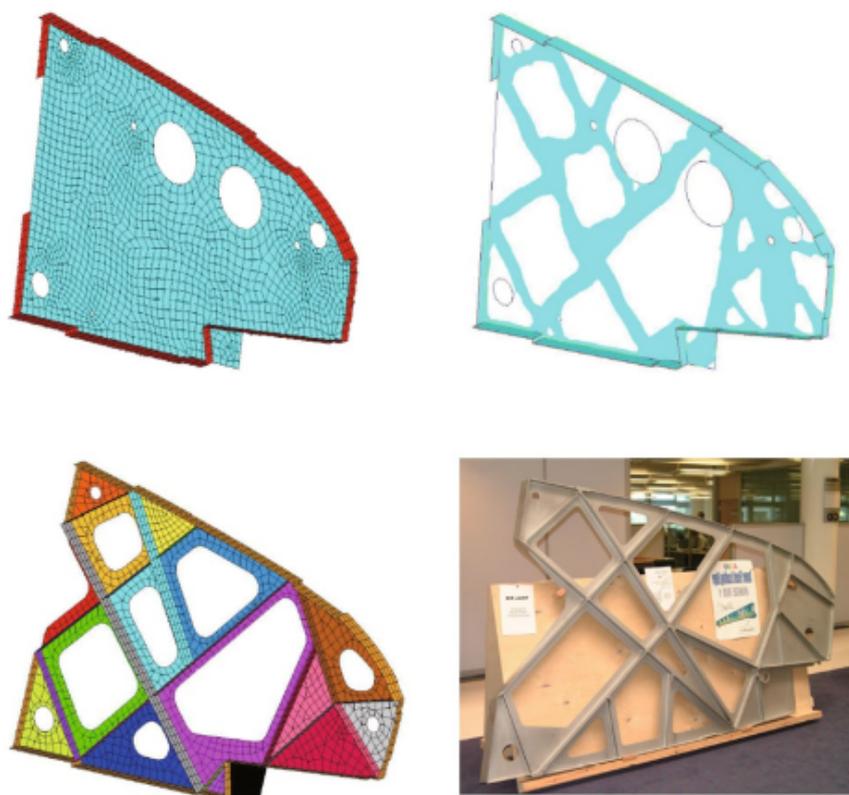
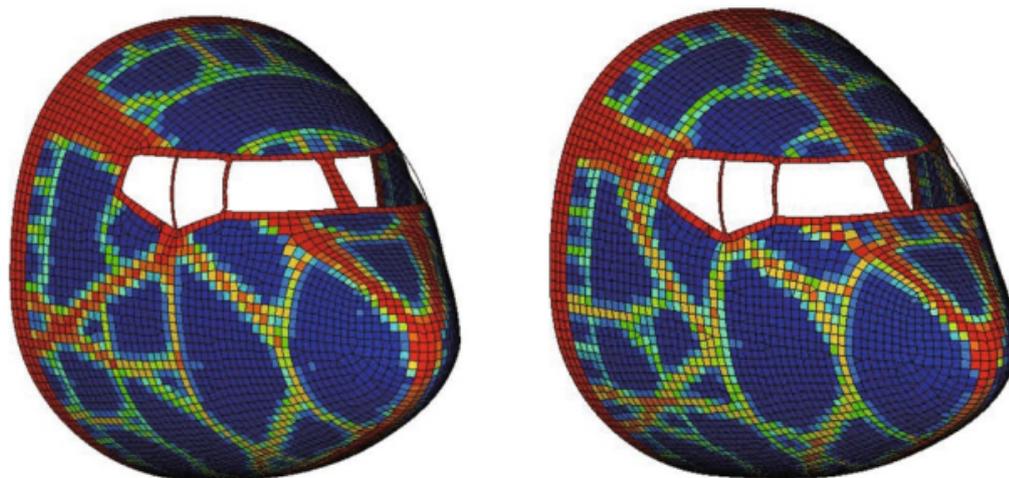


Figura 4.5 – Domínio para otimizar topologicamente (Meng et al. (2019), adaptado).

Esta otimização reduziu mais de 1000kg. Vale destacar o projeto final é o sucesso do esquema de otimização com base em um bom projeto inicial otimizado topologicamente (MENG et al., 2019).

Outro exemplo de *design* otimizado é a preservação da forma do para-brisa do *cockpit*. Apesar dos efeitos prejudiciais do *bird strike* e das condições climáticas extremas, deformações ao redor do para-brisa da cabine podem ser cruciais para os incidentes. Com isso em consideração, a otimização manteve a deformação de coordenadas do pára-brisa para evitar rachaduras, com imposição de energia de deformação locais em zonas de preservação de formas especificadas como restrições adicionais de projeto.

Como ilustrado na Fig. 4.6, a forma proposta para preservar o *design* de OT redistribuiu cargas críticas que levaram a grandes deformações. Como consequência, a energia de deformação medida nos elementos ao redor do pára-brisa é reduzida de 0,16 para 0,02J.



(a) *Cockpit* antes da deformação.

(b) Resultado do *cockpit* depois da otimização.

Figura 4.6 – *Cockpit* otimizado (MENG et al., 2019).

## **Parte II**

# **FUNDAMENTAÇÃO METODOLÓGICA**

# 5 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo é explicitado a metodologia utilizada para realização dos ensaios de caracterização do material. A partir de sua modelagem até seu ensaio mecânico.

Para isso é abordado o material utilizado em conjunto com seu processo de fabricação (com seu número serial mostrado no Apêndice C.1) via impressora 3D, com foco nos ensaios de tração e flexão. Após os ensaios é explicitado o método para observação da fratura.

## 5.1 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Neste estudo foi utilizado filamentos de PLA, fabricados pela UP3D. As características e propriedades do filamento informadas pelo fabricante são mostradas no Quadro 5.1.

Vale ressaltar que estas características são do filamento, obtidas através de corpo de prova injetado, e não fabricado via impressora 3D.

Quadro 5.1 – Propriedades informadas pela fabricante do filamento (UP3D, 2019)

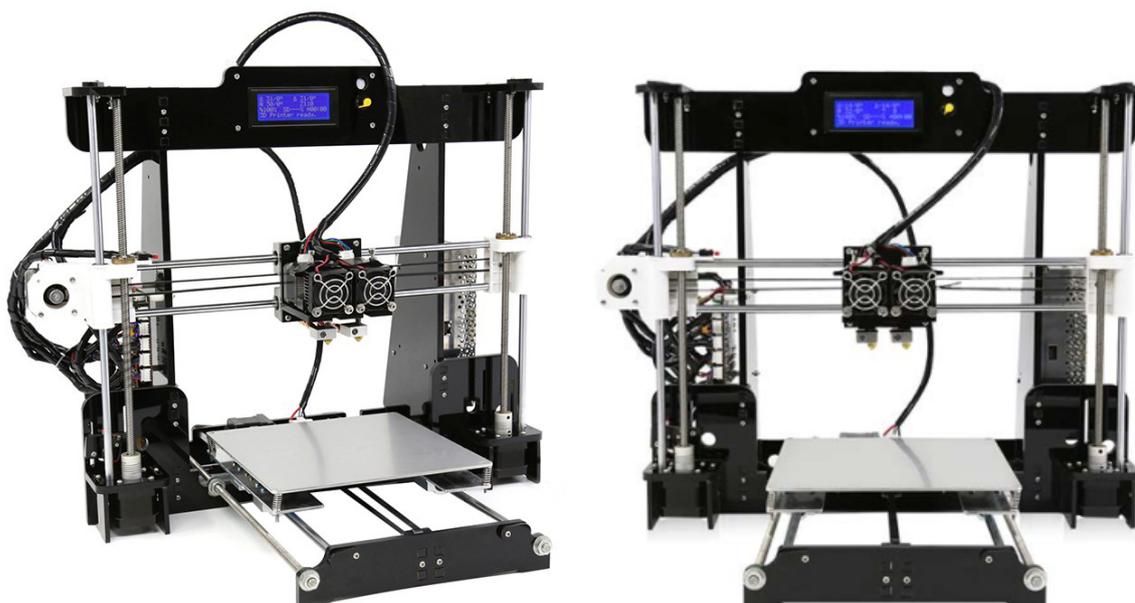
Propriedade	Valor
Temperatura de transição vítrea (°C)	50 - 60
Temperatura de amolecimento (°C)	146-150
Temperatura de extrusão (°C)	190 - 220
Temperatura de mesa (°C)	40 - 60
Módulo de elasticidade em flexão (GPa)	2,74
Deformação última (%)	4,4
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,24

## 5.2 FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para fabricação dos corpos de prova foi utilizado de forma semelhante a metodologia geral descrita na Seção 2.3 em específico na Fig. 2.3. Desta forma foi utilizado do método de modelagem por deposição fundida voltada a prototipagem rápida (impressora 3D).

### 5.2.1 Maquinário utilizado para fabricação

Para fabricar os corpos de prova é utilizado da impressora 3D Anet A8M *Double*, esta é mostrada na Fig. 5.1, sua montagem foi realizada durante este estudo, informações sobre esta montagem é disponibilizada no Apêndice A.



(a) Vista angulada da impressora (Anet 3D Printer (2018) adaptado). (b) Vista frontal da impressora (ANET, 2018).

Figura 5.1 – Impressora Anet A8M Double.

Suas especificações são mostradas no Quadro 5.2, vale ressaltar que essas informações são fornecidas pela fabricante da impressora.

Quadro 5.2 – Especificações da impressora 3D Anet A8M Double (Anet 3D Printer (2018), adaptado).

Característica	Valor
Estrutura	Frame de acrílico
Quantidade de Bicos	2
Volume de impressão (mm <sup>3</sup> )	220×220×240
Resolução de impressão (mm)	±0,1 - 0,2
Espessura das camadas de impressão (mm)	±0,1 - 0,4
Velocidade de movimento (mm/s)	10 - 100
Velocidade de impressão (mm/s)	20 - 120
Temperatura máxima de extrusão (°C)	250
Temperatura máxima da mesa (°C)	100
Software de fatiamento recomendado	Cura
Diâmetro do filamento (mm)	1,75

Um dos critérios fundamentais para impressões precisas é a calibragem dimensional e de fluxo da impressora, estas são abordadas nos Apêndices A.2 e A.3, respectivamente. A calibração da mesa foi feita de modo padrão em sua maioria das vezes, este modo está disponível no Apêndice A.2.1.

### 5.2.2 Metodologia adotada de modelagem

A modelagem dos corpos de prova para os ensaios foi feita através do software CAD de modelagem 3D CATIA® v5R21. Para modelagem é construído o corpo de prova *workbench* denominado de *Part Design*.

Entretanto, o software responsável por fatiar o arquivo não usa do arquivo 3D completo, mas sim do arquivo em formato STL, como o exposto na Seção 2.4, em consequência é necessário utilizar refino de malha para o STL, com o objetivo de obter a melhor discretização do corpo de prova e não propagar erros geométricos. Este refino de malha é avaliado em 3 diferentes situações, estas são descritas abaixo:

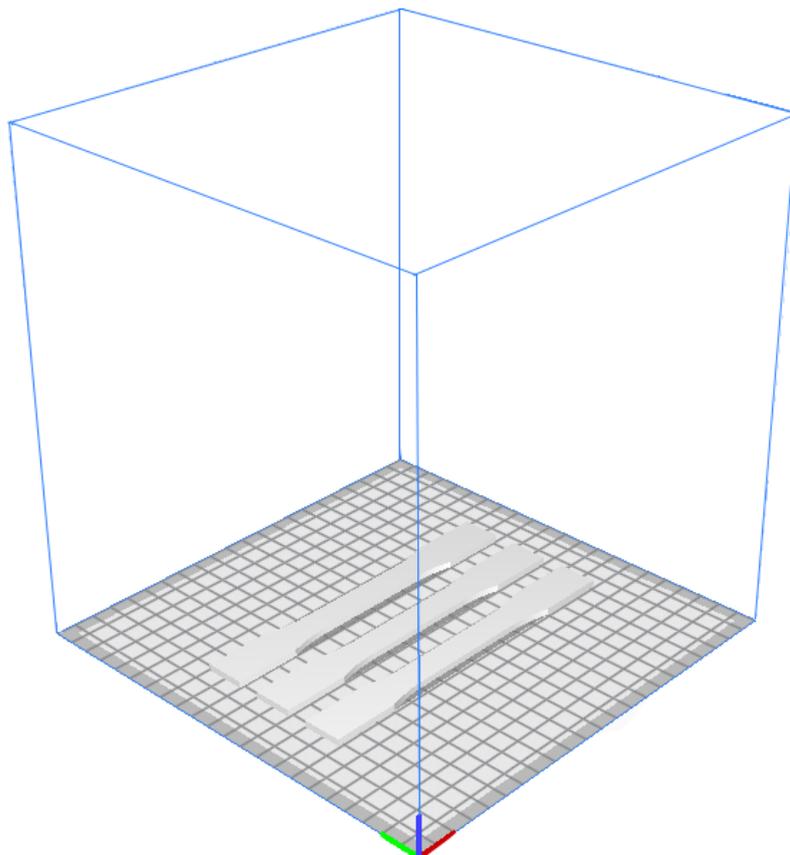
1. Através do *Save As* residente no CATIA® e com o formato de arquivo como .stl;
2. Aumentar para máxima resolução do sólido 3D no CATIA® em seguida salvar o arquivo através do mesmo procedimento exposto no item 1;
3. Através do *workbench* do CATIA® denominado *STL Rapid Prototyping*, via utilização da ferramenta *Tessellation*, com uma malha de resolução específica, controlada através de dois parâmetros, *Sag* e *Step*.

Vale destacar que, *textitSag* é definido como a distância máxima entre a geometria e os triângulos que discretizam a peça e *Step* controla o comprimento dos triângulos de discretização (Dassault Systèmes, 2001).

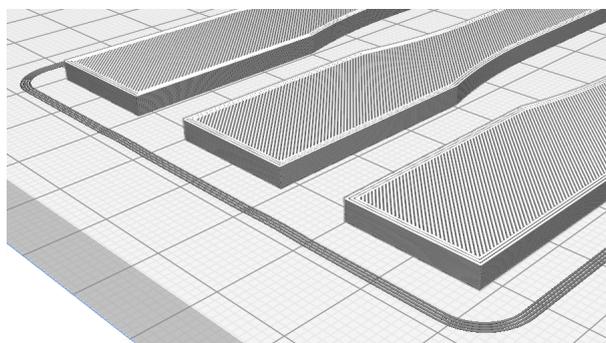
### 5.2.3 Software fatiador e parâmetros de impressão

Para fatiamento da peça foi utilizado o software Cura 4.3.0, este é um software *open source* desenvolvido pela Ultimaker na qual se encontra disponível para cooperação com a comunidade através do GitHub (ULTIMAKER, *release 19 de Março de 2019*).

Foram impressos 3 corpos de prova por vez como mostrado na Fig. 5.2, a calibração da mesa foi realizada de acordo com explicitado no Apêndice A.2.1.



(a) Vista geral dos corpos de prova para fatiamento.



(b) Zoom nos corpos de prova fatiados.

Figura 5.2 – Corpos de prova fatiados no Cura.

Neste software é possível definir diferentes parâmetros de impressão, desta forma é feita impressão em diferentes parâmetros para avaliar quais parâmetros conseguem oferecer melhores propriedades mecânicas, com utilização de parâmetros para melhor aderência com a mesa, melhor continuidade da peça e melhor uniformidade. Os parâmetros utilizados para impressão 3D são exibidos no Quadro 5.3.

Quadro 5.3 – Parâmetros de impressão adotados para fabricação dos corpos de prova.

Parâmetro	Conjunto de parâmetros de impressão 1	Conjunto de parâmetros de impressão 2	Conjunto de parâmetros de impressão 3
<b>Temperatura (°C)</b>			
Impressão da primeira camada (PLA)	215	215	225
Impressão geral (PLA)	210	210	220
Mesa da primeira camada (PLA)	65	70	75
Mesa geral (PLA)	60	65	70
<b>Velocidade (mm/s)</b>			
Impressão da primeira camada	20	22,5	60
Impressão	40	45	60
Retração	25	25	30
<b>Fluxo</b>			
Percentual de extrusão	75,117%	75,117%	75,117%
<b>Dimensões (mm)</b>			
Altura de camada inicial	0,3	0,3	0,3
Altura de camada geral	0,2	0,2	0,2
Largura do cordão de impressão	0,4	0,4	0,4
Largura da parede	0,8	0,8	0,8
Distância de retração	1	6	8
Distância entre peça e <i>Skirt</i>	4	5	5
<b>Preenchimento</b>			
Porcentagem de preenchimento	100%	100%	100%
Sentido de preenchimento	[±45]	[±45], [0], [30], [45], [60], [90] e [v]	[±45], [0], [90] e [v]
<b>Adesão a mesa</b>			
Tipo <i>skirt</i> de contorno	2 voltas	3	3
<b>Outros</b>			
<i>Ironing</i>	Padrão concêntrico	Desativado	Desativado
Ventiladores ligados	100% da potência	100% da potência	100% da potência

O percentual de extrusão impressão foi configurado baseado na calibração explicitada no Apêndice A.3 e a largura do cordão de impressão foi definido com base no diâmetro do bico extrusor.

Vale ressaltar que nem todos os sentidos de impressão foram utilizados em todos os modelos de flexão e tração.

#### 5.2.4 Ângulos de impressão

Para avaliar o comportamento do material com diferentes ângulos de deposição da fibra este é preparado impressões para testar a partir desta diferença. Aproveitado dos ângulos de  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $v$  para montar o modelo numérico ortotrópico. Os ângulos utilizados para impressão são exibidos na Fig. 5.3 com esquemático do corpo de prova para tração.

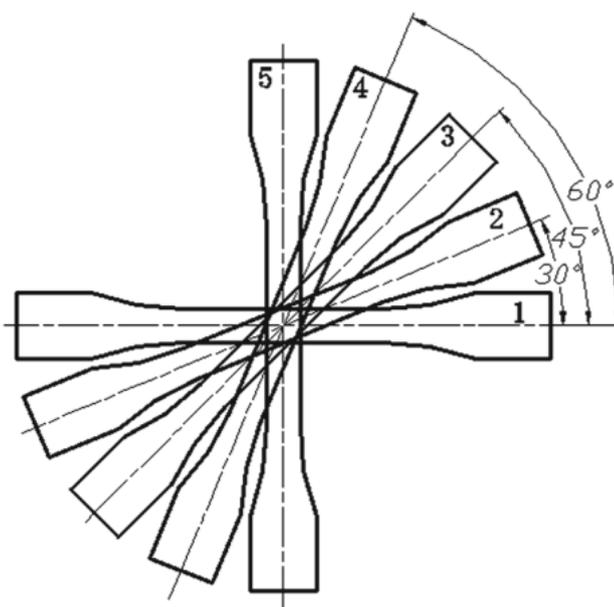


Figura 5.3 – Ângulos de impressão (YANG et al., 2018)

Vale destacar que o ângulo de  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$  também são utilizados para corpos de prova de flexão. Neste estudo é adotado notação semelhante aos materiais compósitos para relacionar as direções de impressão, a categorização desta notação está disponível no Apêndice E

Neste estudo,  $v$  foi considerado um ângulo de impressão, definido como o corpo de prova impresso na direção perpendicular a mesa de impressão.

### 5.3 ENSAIOS, EXTENSOMETRIA E MEDIÇÕES

Ensaio mecânicos com extensometria são utilizados para caracterizar o material. Para averiguar as dimensões da peça foi utilizado uso de paquímetro e medições de massa feitas através de balança com alta precisão (suas informações estatísticas são apresentadas na Seção 5.3.4). Para tratamento dos dados provenientes dos ensaios é utilizado do software MATLAB em sua versão R2011a.

### 5.3.1 Ensaio de tração

O Ensaio de tração foi realizado em acordo com as definições apresentadas na norma ASTM D638-14 (ASTM, 2014), foi escolhido o corpo de prova do tipo I, como o recomendado na norma, as características dimensionais do corpo de prova são mostradas na Fig. 5.4.

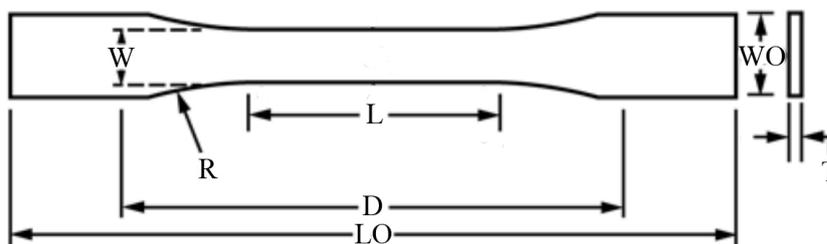


Figura 5.4 – Corpo de prova tipo I da norma ASTM D638-14 (ASTM (2014) adaptado).

Na Tabela 5.1 é mostrado as dimensões do corpo de prova do tipo I, para cada trecho e suas tolerâncias permitidas devido a variações causadas pelo processo de fabricação.

Tabela 5.1 – Dimensões e tolerâncias para corpo de prova do tipo I (ASTM (2014) adaptado).

Dimensão	Significado	Valor	Tolerância	Máximo	Mínimo
WO	Largura	19,0	0,75	19,75	18,25
W	Largura da seção estreita	13,0	0,50	13,50	12,50
LO	Comprimento total	165,0	6,50	171,50	158,50
L	Comprimento da seção estreita	57	0,50	56,50	57,50
R	Raio entre seções	76,0	1,0	77,0	75,0
D	Distância entre garras	115,0	5,0	120,0	110,0
T	Espessura	3,2	0,40	3,60	2,80

Este corpo de prova é modelado com o explicitado na Seção 5.2.2, desta forma é aproveitado do quarto de simetria, e após o desenho base é gerado o representante do sólido 3D, sua planta está disponível no Apêndice D.1.

A norma D638-14 define algumas característica de ensaio com objetivo de padronizar as variantes, desta forma o ensaio é feito com velocidade de 5mm/min com 5 corpos de prova para cada direção avaliada.

Desta forma os primeiros 5 corpos de prova fabricados têm como objetivo obter o módulo de elasticidade e outros 5 corpos de prova com o objetivo de medir a deformação transversal e desta forma calcular o Coeficiente de Poisson.

<sup>0</sup> Cada vez mais estudos investigam as propriedades mecânicas dos processos FDM e FFF para utilização em componentes estruturais com peças funcionais e duráveis, o presente estudo visa investigar este tema, como debatido no Capítulo 1.

### 5.3.2 Ensaio de flexão

O ensaio de flexão é realizado em acordo com as definições apresentadas na norma D790-17 (ASTM, 2017), o corpo de prova escolhido é aplicado para materiais para moldagem (termoplásticos e termofixos), este foi escolhido devido a uma maior comparabilidade entre corpos impressos e corpos fabricados por injeção e outros métodos convencionais. As indicações das dimensões principais deste corpo de prova são apresentadas na Fig. 5.5, sua planta está disponível no Apêndice D.2.

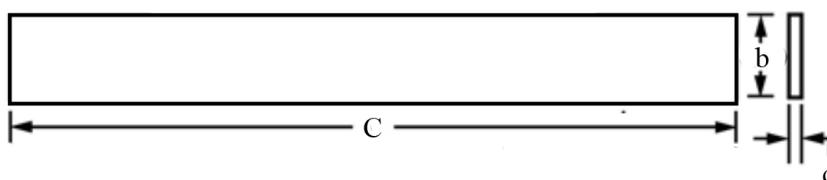


Figura 5.5 – Corpo de prova para materiais para moldagem (Termoplásticos e Termofixos).

Com  $C$  igual a 127mm,  $b$  igual a 12,7mm e  $d$  igual a 3,2mm

A relação mostrada na Eq. 5.1 mostra a distância entre apoios, vale ressaltar que esta equação está de acordo com as instruções presente na norma.

$$L_s = 16d \quad (5.1)$$

Onde  $L_s$  representa o comprimento entre apoios em mm,  $d$  a espessura do corpo de teste em mm, ao substituir o valor de  $d$  esta equação resulta em 51,2mm.

A norma define a velocidade de movimento dos apoios que realizam o movimento de teste, esta é calculada pela Eq. 5.2.

$$R = \frac{ZL_s^2}{6d} \quad (5.2)$$

Com  $R$  a velocidade de movimento da garra em mm/min, e  $Z$  a taxa de deformação da fibra exterior em mm/mm/min ( $Z$  deve assumir o valor de 0,01). Esta equação resulta em uma velocidade de 1,36 mm/min.

O momento de termino do ensaio é determinado pela norma como a deflexão definida pela Eq. 5.3 ou caso de ruptura do corpo de prova.

$$D_{fim} = \frac{rL_s^2}{6d} \quad (5.3)$$

Onde  $D$  representa em mm o alongamento no meio do vão entre apoios no qual o ensaio pode ser finalizado. Logo, a Eq. 5.3 resulta em 6,82mm.

O módulo de elasticidade é calculado pela Eq. 5.4. Vale ressaltar que de acordo com a norma esta formulação tem sua validade para materiais que seguem a lei de Hooke (debatida na Seção 3.3

$$E_b = \frac{L_s^3 m}{4bd^3} \quad (5.4)$$

Com  $E_b$  o módulo de elasticidade em flexão em MPa,  $b$  é a largura do corpo de prova e  $m$  é inclinação da parte linear da curva carga-deflexão em N/mm.

O conjunto do equacionamento para cálculo de tensão (Eq. 5.5a) e deformação (Eq. 5.5b) é mostrado na Eq. 5.5. Vale ressaltar que a norma exige reportar a curva tensão-deformação nos relatórios produzido do ensaio.

$$\sigma_f = \frac{3PL_s}{2bd^2} \quad (5.5a)$$

$$\epsilon_f = \frac{6Db}{L_s^2} \quad (5.5b)$$

Onde  $\sigma_f$  representa a tensão (em MPa) atuante no ponto de maior deformação (face livre),  $P$  é a carga em N para cada ponto e  $\epsilon_f$  é a deformação (mm/mm) do corpo de prova.

A Eq. 5.5a não leva em consideração os efeitos de carga concentrada, logo para maior precisão é necessário outra formulação, desta forma pode-se utilizar a Eq. 5.6 conhecida como equação de Wilson-Stokes na qual considerar os efeitos de carga concentrada (WILSON, 1891).

$$\sigma = \frac{12P}{bd^3} \left( \frac{L}{4} - \frac{d}{2\pi} \right) \left( x - \frac{d}{2} \right) + \frac{P}{\pi bd} \quad (5.6)$$

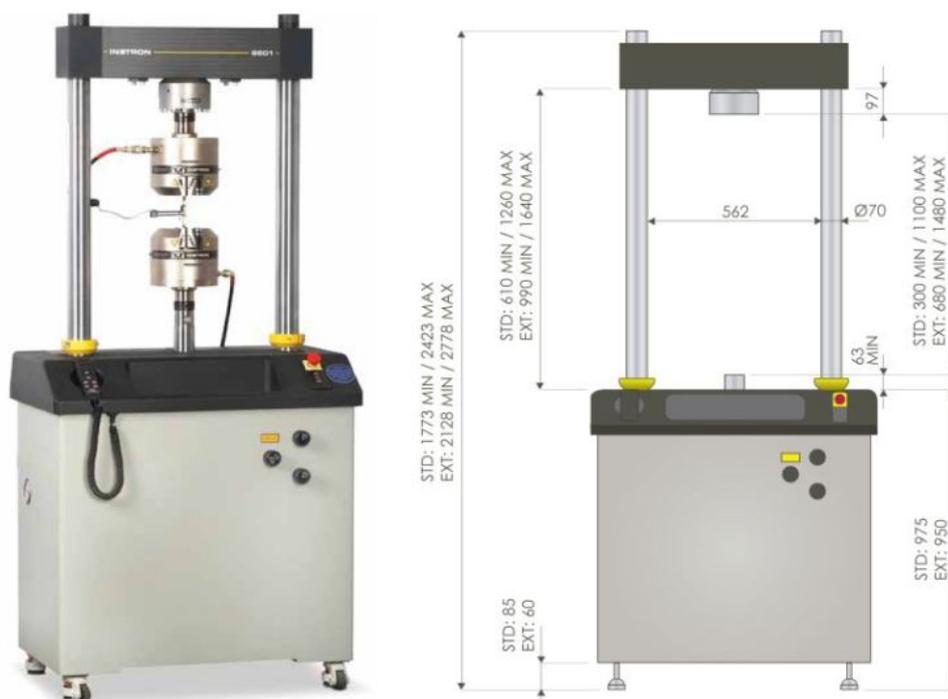
Com  $x$  o ponto no qual se quer medir a tensão atuante (no caso 3,2mm).

Para avaliação se o ensaio é feito com uma viga em configuração de flexão pura, este tem comparada a tensão obtida com aplicação da tensão corrigida pela equação de Wilson-Stokes com a equação fornecida na norma ASTM.

O ensaio de flexão com ponte otimizada topologicamente não possui uma norma na ASTM, desta forma para definir padrões de repetibilidade do ensaio este tem seus parâmetros, na medida do possível, adaptados da norma ASTM D790-17.

### 5.3.3 Maquinário para realização dos ensaios

Para realizar os ensaios é utilizado da máquina de tração Instron 8801 (Fig. 5.6), esta é disponibilizada no laboratório de caracterização de materiais na Faculdade do Gama da Universidade de Brasília.



(a) Máquina de ensaio Instron 8801 (b) Especificações dimensionais em mm da Instron 8801 (Instron (2012)).

Figura 5.6 – Máquina de ensaio Instron 8801.

As características principais deste maquinário são mostradas no Quadro 5.4.

Quadro 5.4 – Características do maquinário Instron 8801 (Instron (2012), adaptado).

Característica	Valor
Capacidade de carga (kN)	100
Célula de carga	Dynacell
Rigidez do frame (kN/mm)	390
Peso do frame (kg)	600
Acuracidade de carga	$\pm 0.5\%$ da carga indicada

Para aquisição dos dados é utilizado do software Bluehill da Instron.

### Extensometria para ensaio de tração

Para cálculo de  $E$  a norma ASTM (2014) indica a necessidade de usar um extensômetro com erro máximo de 0,02%, para isso é utilizado do extensômetro da Instron 2620-601, suas características são mostradas no Quadro 5.5.

Quadro 5.5 – Características do extensômetro Instron 2620-601 (Instron (2018) adaptado).

<b>Comprimento de medição (mm)</b>	12,5	<b>Diâmetro do CP (mm)</b>	3-25
<b>Viagem (mm)</b>	40	<b>Faixa de temperatura (°C)</b>	-80 a 200
<b>Largura do CP (mm)</b>	0-25	<b>Largura do extensômetro (mm)</b>	21
<b>Espessura do CP (mm)</b>	3-12,5	<b>Altura do Extensômetro (mm)</b>	63

Como debatido na Seção 3.2 para caracterizar materiais isotrópicos é necessário definir  $E$  e  $\nu$ , logo para o coeficiente de Poisson, em acordo com sua formulação apresentada na Eq. 3.5c, é necessário de dados de deformação de duas dimensões, no caso o  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$ , estas deformações devem ser medidas através de extensômetro<sup>1</sup>.

Para obter dados de  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$  foram realizadas medições em diferentes sentidos de posicionamento do extensômetro, com posicionado no sentido longitudinal (Fig. 5.7) para os 5 primeiros corpos de prova e no sentido transversal para outros 5 corpos de prova.

Vale ressaltar que para o sentido transversal o extensômetro inicia com uma deformação prévia, esta deformação é definida como o zero e os dados seguintes são subtraídos deste valor, isso é feito no pós processamento dos dados.

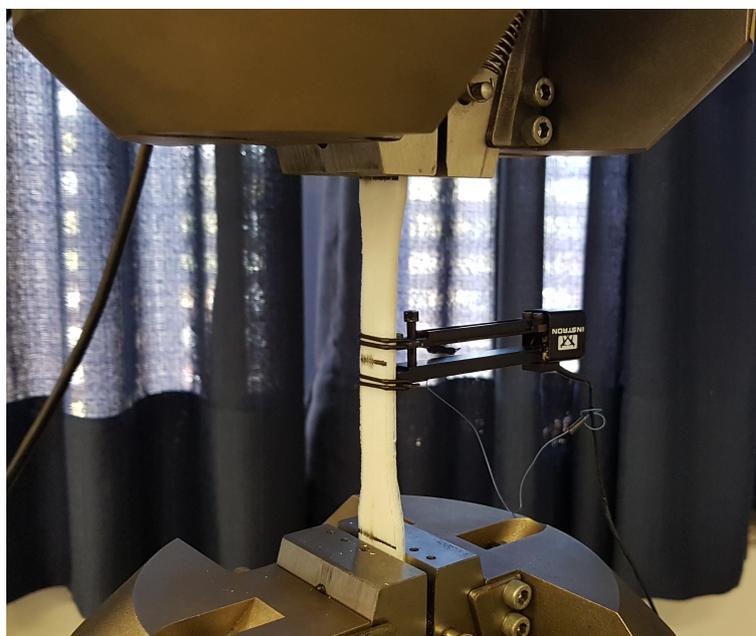


Figura 5.7 – Posição do extensômetro no corpo de prova.

<sup>1</sup> A deformação informada na máquina, possui divergência linear dos valores medidos pelo extensômetro, esta variação é debatido no Apêndice B.

### Adaptadores para ensaio de flexão

Para realizar o ensaio de flexão é necessário adaptar um ensaio de compressão, para isso foi utilizado de adaptador no qual serve de apoio e aplicação de força.

Figura 5.8(a) mostra o adaptador isolado e Fig. 5.8(b) mostra o adaptador utilizado em conjunto com corpo de prova para flexão, vale ressaltar que este corpo de prova está de acordo com o apresentado na Seção 5.3.2.



(a) Adaptador para ensaio de tração.

(b) Corpo de prova com adaptadores em posição para ensaiar.

Figura 5.8 – Adaptador para ensaio de flexão.

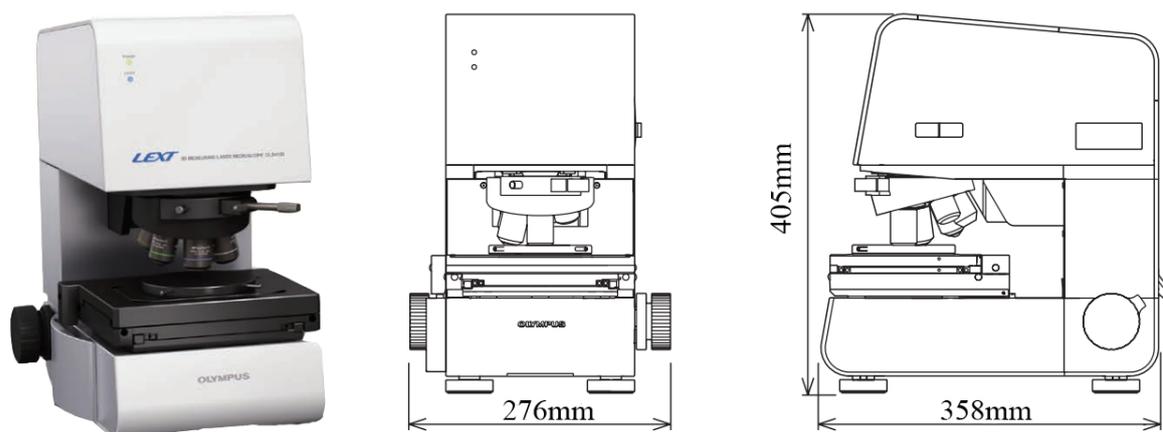
### 5.3.4 Medições físicas

Foram realizados 3 medições de massa para cada corpo de prova, a fim de determinar a densidade a partir do volume obtido em CAD. para realizar a medição da massa foi utilizada da balança digital Shimadzu modelo ATX 224, esta tem leitura de 0,1mg com desvio padrão  $\leq 0,1\text{mg}$ .

De acordo com o debatido na Seção 5.3.1 é necessário medir o corpo de prova para garantir que suas dimensões estão dentro das tolerâncias definidas pela norma, estas medições foram realizadas com paquímetro com capacidade de  $\pm 0,02\text{mm}$ .

### 5.3.5 Análise via microscópio confocal

As imagens da uniformidade do filamento foram realizadas através do microscópio confocal OLYMPUS LEXT OLS4100 (Fig. 5.9(a)), com dimensões especificadas no esquemático da Fig. 5.9(b).



(a) Microscópio confocal (b) Esquemático com dimensões principais do microscópio confocal OLYMPUS OLYMPUS LEXT OLS4100. LEXT OLS4100.

Figura 5.9 – Microscópio confocal OLS4100 OLYMPUS (Olympus (2013) adaptado).

As características gerais deste microscópio confocal são mostradas no Quadro 5.6. Vale ressaltar que este sistema vem integrado com computador e software de processamento da imagem, entretanto estes não são abordados neste estudo.

Quadro 5.6 – Características do microscópio confocal OLYMPUS LEXT OLS4100 (Olympus (2013) adaptado).

Propriedade	Valor
Lentes objetivas	<i>BF Plan Semi-apochromat 5x, 10x e LEXT-Dedicated Plan Apochromat 20x, 50x, 100x</i>
Largura da bancada XY (mm)	100x100
Zoom	Zoom Digital de 1x-8x e zoom óptico de 1x-8x
Ampliação total	108x-17280x
Acuracidade	$\leq 0,2 + \frac{L}{100} \mu\text{m}$ ( $L$ = Comprimento de medição)

## 6 METODOLOGIA NUMÉRICA

Neste capítulo demonstra a metodologia de realização dos estudos numéricos, logo há o fluxo de simulação, com enfoque em validação do modelo e da hipótese de material isotrópico e ortotrópico para materiais impressos. O modelo debatido de flexão e tração com diferentes ângulos no qual trabalha como teste para avaliação da predicabilidade das peças impressas para diferentes casos de carregamento e direções de impressão.

Após as simulações de validação e predição é focado em otimizações topológicas bases para prova de conceito e estudo de possibilidade.

### 6.1 FLUXO DE SIMULAÇÃO

As simulações propostas foram conduzidas em acordo com o fluxograma de blocos apresentado na Fig. 6.1. O objetivo inicial das simulações foram as validações dos modelos isotrópicos e ortotrópicos, após essa validação.

No bloco 1, foi feito a comparação com os resultados experimentais. O bloco 2 foi analisado o primeiro modelo ortotrópico, este é responsável pelo predição do comportamento da peça impressa em diferente direções de impressão ( $[0]$ ,  $[30]$ ,  $[45]$ ,  $[\pm 45]$ ,  $[60]$  e  $[90]$ ).

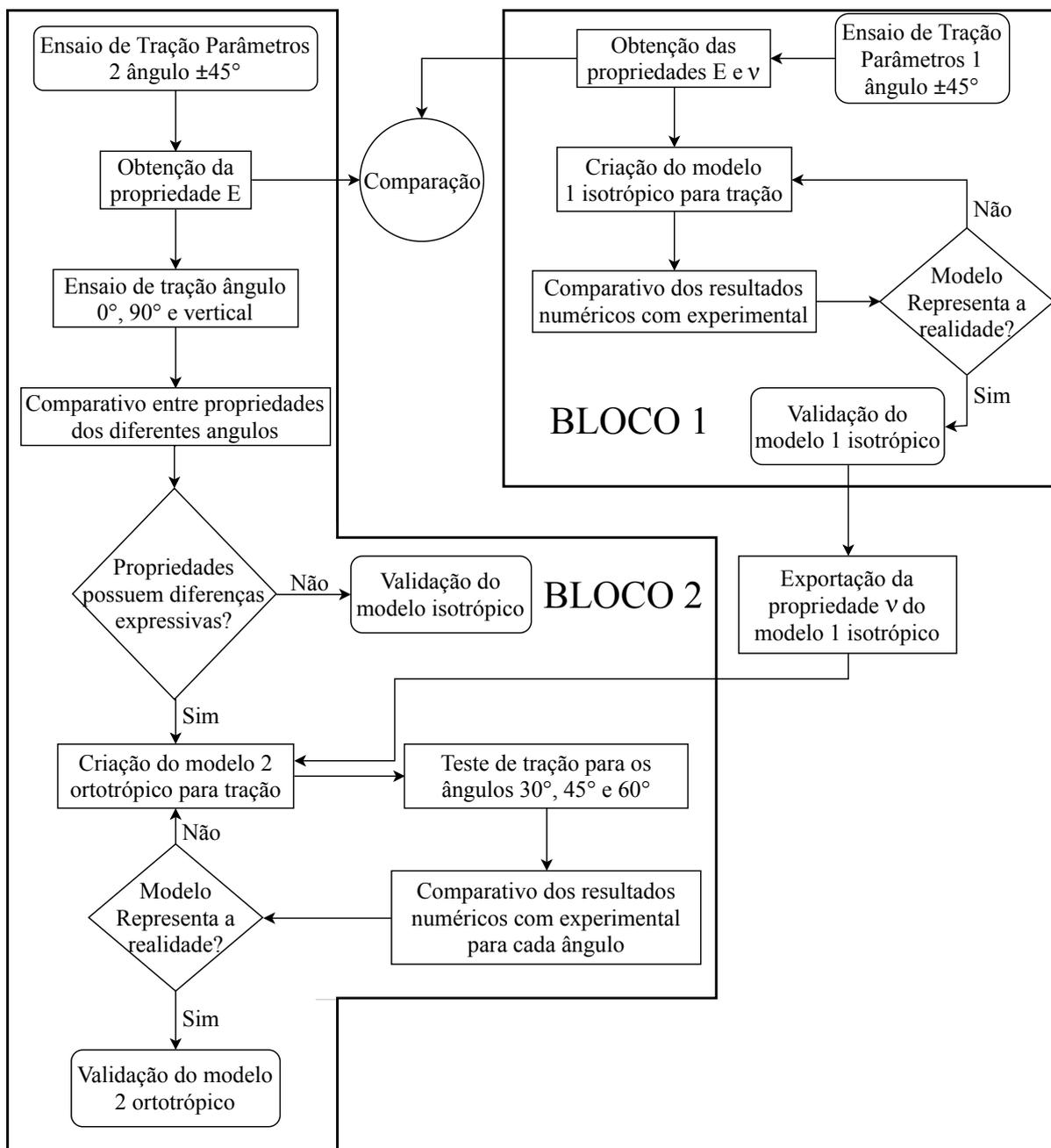


Figura 6.1 – Fluxo de simulação utilizado (fonte: autor).

Os blocos 3, 4 e 5 (Fig. 6.2) objetivam os ensaios com o terceiro conjunto de parâmetro de impressão, em seguida é feita modelagem tanto para material isotrópico (bloco 3) quanto para material ortotrópico (bloco 4 e 5). Nesta etapa é verificada a capacidade de predição do modelo ortotrópico para casos de carregamento em flexão.

No bloco 5 é realizado os testes com a otimização topológica da ponte em conjunto com avaliação da capacidade de predição dos modelos.

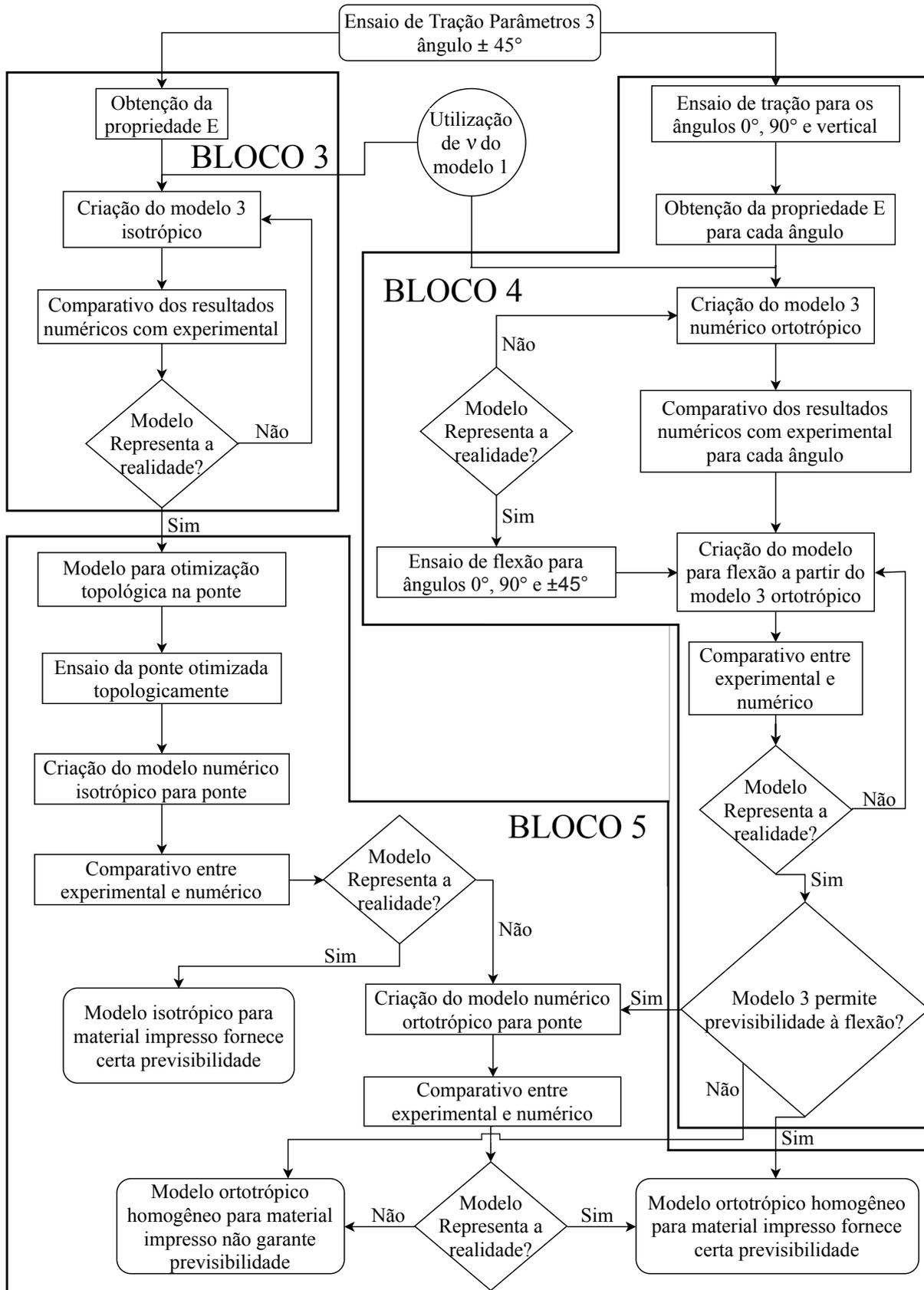


Figura 6.2 – Fluxo de simulação utilizado (fonte: autor).

### 6.1.1 Software utilizado

Para simulação é utilizado do software ANSYS R19.0. As simulações exigiram dois *workbenches* do *Structural Analysis*, o *Static Structural* como componente base e *Topology Optimization* como componente que possibilita a otimização topológica.

Nos modelos base debatidos na Seção 6.2 é necessário modificar partes da geometria em relação ao debatido na Seção 5.2.2, desta forma para criar separação de superfícies e ajustes de modelo na geometria é utilizado do SpaceClaim do ANSYS.

## 6.2 MODELO BASE

O modelo criado para simulações está em acordo com o debatido na Seção 3.2, logo este modelo admite que o material é isotrópico e homogêneo.

As propriedades isotrópicas experimentais caracterizam o modelo do material, estas são o módulo de elasticidade ( $E$ ), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), densidade ( $\rho$ ) e tensão última do material ( $\sigma_{ult}$ ), é feita a consideração de que o PLA possui um comportamento completamente frágil, logo não possui tensão de escoamento, desta forma para entrada do ANSYS é utilizado de  $\sigma_y = 0$ .

A partir destas propriedades o ANSYS calcula as demais propriedades através da formulação presente no Quadro 3.2, com relação entre  $E$  e  $\nu$  com  $G$  e  $K$ .

Para as simulações 3D foi utilizado do elemento SOLID186, este é um elemento do ANSYS definido por 20 nós com três graus de liberdade por nó (ANSYS, 2018).

### 6.2.1 Modelo de tração

Para tração foi aproveitado diretamente o desenho feito em CAD, explicitado na Seção 5.2.2, mas é adicionado as separações das regiões para aplicação das condições de contorno, o modelo criado para tração é mostrado na Fig. 6.3.



Figura 6.3 – Modelo de tração em ANSYS.

A região A defini o local do engaste, representante da garra superior da Instron 8801 e B definido como local de aplicação da força, este representa a garra inferior da Instron 8801.

As superfícies com as condições de contorno são definidas em razão da posição de alocação das garras. A força aplicada neste modelo dependem da média obtida na zona de interesse após o tratamento dos resultados experimentais.

O modelo do corpo de prova em tração tem seu comparativo entre numérico e experimental com os dados de tensão e deformação no local onde o extensômetro é fixado (Fig. 7.13), o que não coincide com o ponto de tensão máxima do corpo de prova. Isto ocorre devido a fixação das garras gerarem um ponto crítico.

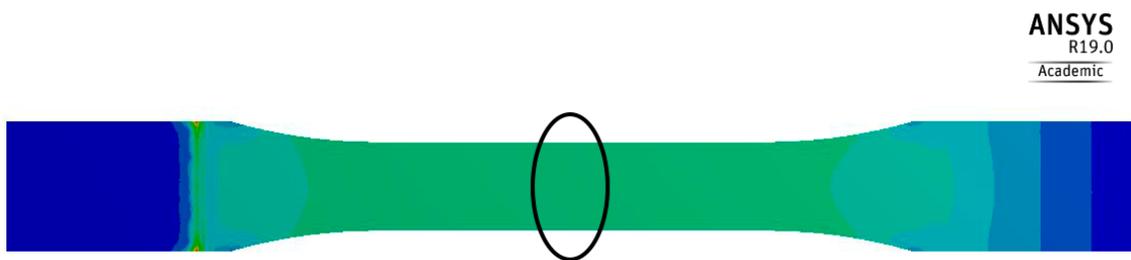


Figura 6.4 – Campo de tensão obtido via ANSYS e local de tensão máxima.

Para simulação dos resultados com modelo em ângulos diferentes, este tem o CAD rotacionado com referência ao sentido global dos eixos, para manter o sentido da carga e do engaste é utilizado um eixo secundário, que utiliza o sentido longitudinal da peça como guia do eixo x. Esta metodologia é aplicável tanto para tração quanto para flexão.

### 6.2.2 Modelo de Flexão

Para flexão é aproveitado do desenho feito em CAD, entretanto é necessário fazer modificações para que este aproxime-se do ensaio de flexão, o modelo criado para flexão é mostrado na Fig. 6.5, com Fig. 6.5(a) para local de aplicação da força e Fig. 6.5(b) para local de apoio do corpo de prova.

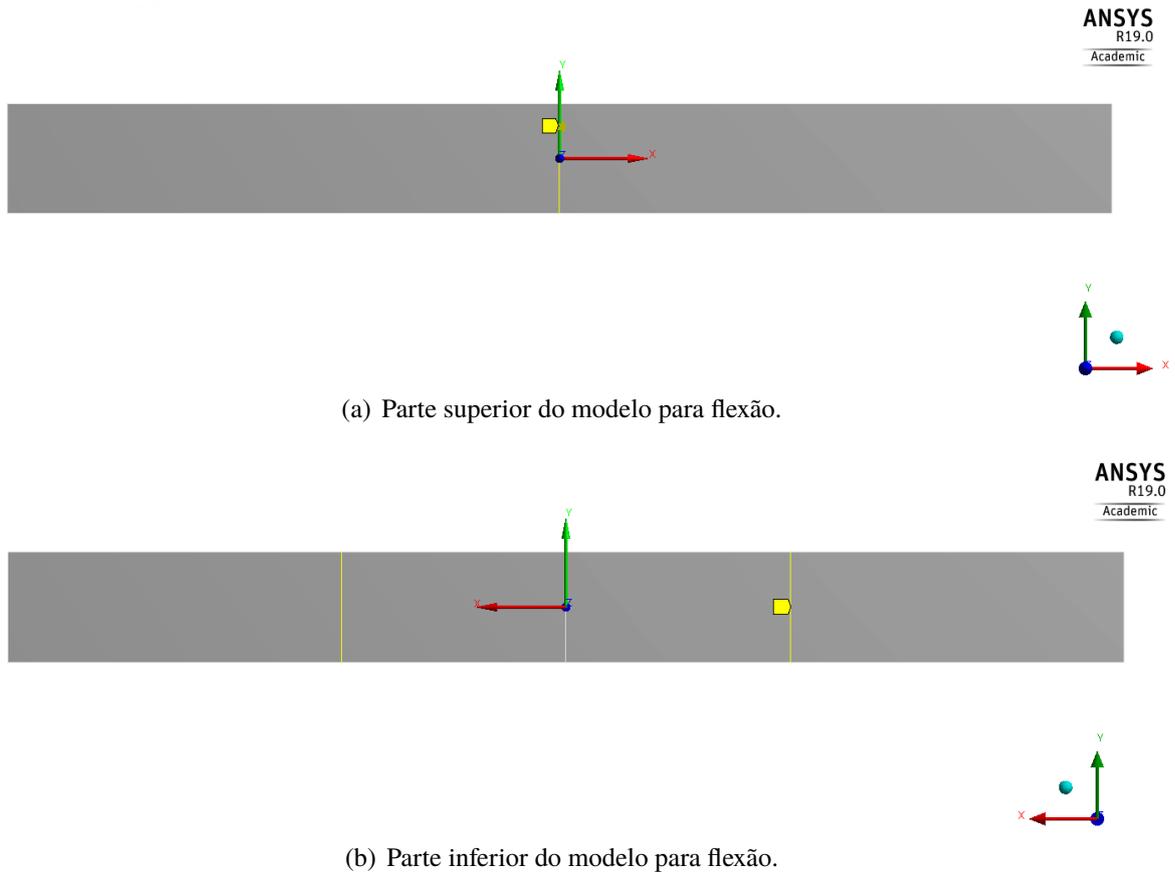


Figura 6.5 – Modelo de flexão em ANSYS.

Com A definido como local de apoio do corpo de prova no suporte e B definido como local de aplicação do deslocamento.

Os 3 cilindros adicionados tem a finalidade de aproximar de uma melhor forma a aplicação da força e dos contatos, o diâmetro e comprimento destes cilindros estão de acordo com o suporte para ensaio de tração e com a norma ASTM D790-17.

Para que este cilindro não altere os resultados este é modelado de forma a ter uma resistência muito maior do que o corpo de prova ( $E_{cil} \rightarrow \infty$ ), desta forma não sofre deformações relevantes.

Assim como as forças para o modelo de tração, os deslocamentos aplicados neste modelo dependem da média obtida após os resultados experimentais.

### 6.2.3 Modelo para otimização topológica

Para otimizações topológicas primeiramente é confirmado a metodologia utilizada através de 5 casos de estudo. Todos os casos de estudo são definidos como reduzir até 40% a massa original com maximização da rigidez, este tem todo o domínio da peça otimizável com exceção do local de aplicação das condições de contorno.

Meng et al. (2019) destaca que materiais no qual demanda considerações especiais por possuírem certo grau de anisotropia, estruturas feitas em cadascas ou poros necessitam de metodologias de otimização no qual demandam considerações especiais, o uso desses materiais, em essência, mudou a natureza do problema da escala macroscópica para uma escala microscópica.

Com a finalidade de simplificar a problemática, as simulações foram feitas com consideração do modelo de material isotrópico.

O elemento utilizado para simulações 2D foi SHELL181, este é um elemento de quatro nós com seis graus de liberdade em cada nó (ANSYS, 2010). Este elemento tem boa adaptabilidade e compatibilidade com a *workbench* de otimizações topológicas.

Na Fig. 6.6 é mostrado as condições de contorno para o caso de estudo 1, este também utilizado para análise de convergência de malha baseado na otimização da geometria.

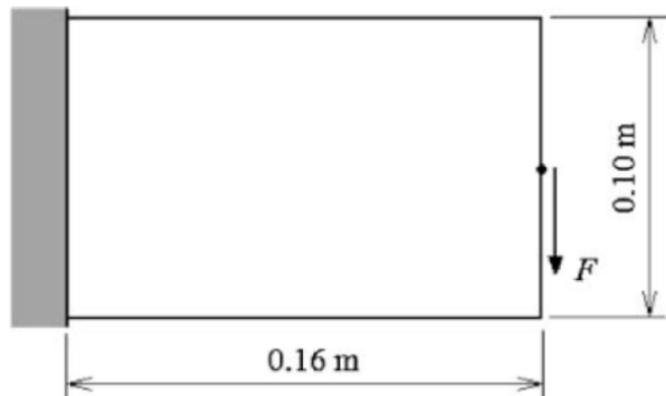


Figura 6.6 – Condições de contorno para análise de convergência de malha com caso de estudo 1 (GUNWANT; MISRA, 2012).

Figura 6.7 mostra as condições de contorno impostas para caso de estudo 2.

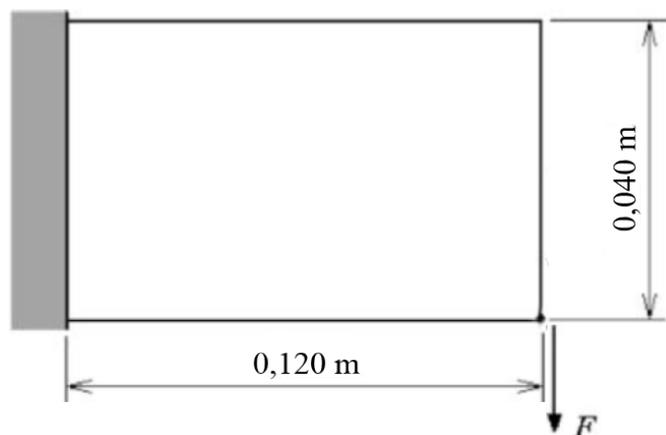


Figura 6.7 – Condições para caso de estudo 2 (fonte: Gunwant e Misra (2012) com adaptações).

Figura 6.8 mostra as condições de contorno impostas para caso de estudo 3.

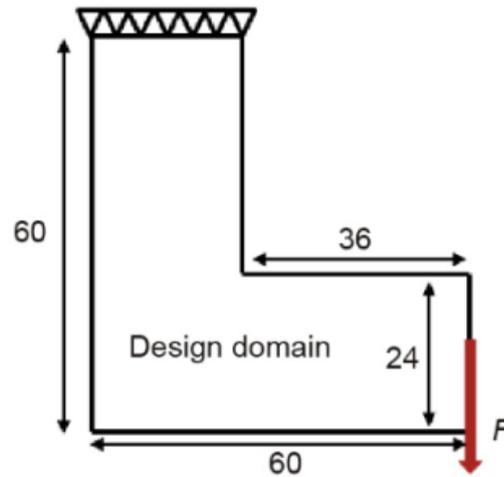


Figura 6.8 – Condições para caso de estudo 3 (LIU et al., 2018).

Figura 6.9 mostra as condições impostas para caso de estudo 4, este é o caso de estudo 3D. Diferente do modelo 2D este modelo 3D tem como objetivo a redução de 20% da massa original.

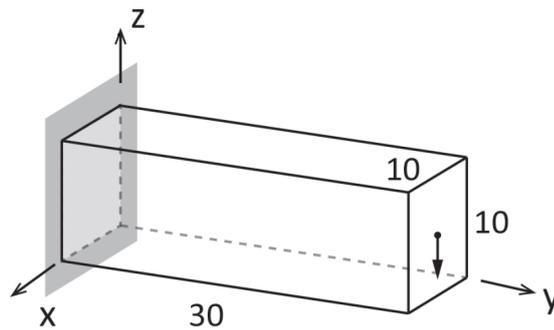


Figura 6.9 – Condições para caso de estudo 4 (PARK; SUTRADHAR, 2014).

Figura 6.10 mostra as condições impostas para otimização do caso de estudo 5. Este caso de otimização é utilizado para validação experimental, desta forma sua geometria é impressa através da metodologia e equipamentos descrita na Seção 5.2.

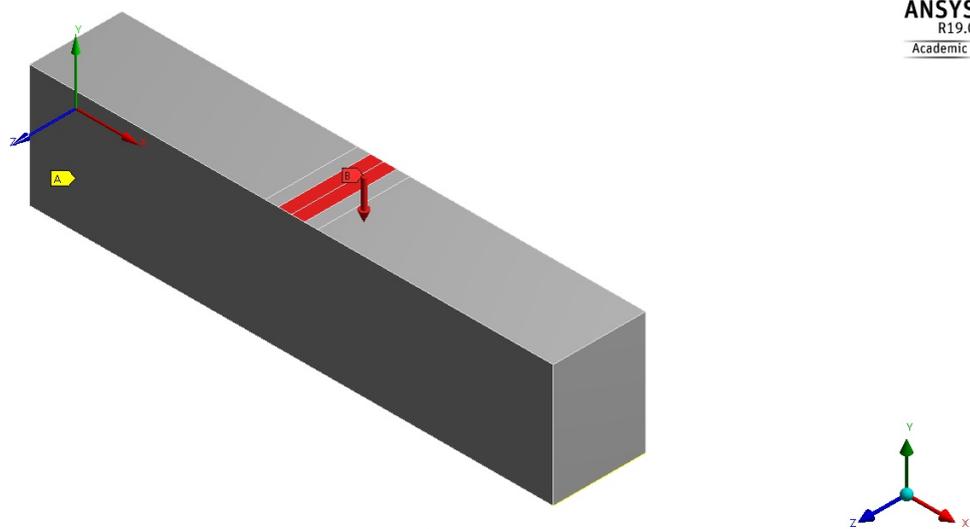


Figura 6.10 – Condições para caso de estudo 5.

O corpo de prova do caso de estudo 5 foi ensaiado em duas condições de apoio, estas condições são mostradas na Fig. 6.11, Fig. 6.11(a) para condição de apoio 1 e Fig. 6.11(b) para condição de apoio 2. Vale destacar que a otimização foi conduzida com o a condição de apoio 1.



(a) Caso de estudo em condição de apoio 1.



(b) Caso de estudo em condição de apoio 2.

Figura 6.11 – Condições de apoio para ensaio da ponte.

Vale destacar que todos os casos de estudo supracitados tem suas zonas de otimização liberadas em todo o corpo com excessão das condições de contorno.

## **Parte III**

# **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

# 7 RESULTADOS EXPERIMENTAIS, NUMÉRICOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo há relatos e discussões das ocorrências do processo de fabricação e os resultados obtidos dos ensaios experimentais focando no principal conjunto de impressão.

Desta forma foi feita comparação entre as direções de impressão  $[\pm 45]$  para os diferentes conjuntos de impressão tanto em tração quanto em flexão. Em seguida comparativo entre as direções [0], [90] e [v] dos demais parâmetros de impressão.

Foi averiguado validade da hipótese de material isotrópico e material ortotrópico através de simulações numéricas dos ensaios experimentais, desta forma avaliando sua capacidade preditiva para diferentes configurações de carregamento.

As direções de impressão [30], [45] e [60] foram usadas exclusivamente para averiguar a capacidade preditiva dos modelos numéricos, suas propriedades não foram comparadas com as demais direções.

Após validação dos modelos e dos ensaios é seguido para otimização topológica, sendo primeiramente abordado as validações metodológicas e em seguida suas confirmações experimentais, com verificação numérica dos resultados.

## 7.1 PRÉ E ÍTERIM IMPRESSÃO

### 7.1.1 Discretização do arquivo .stl

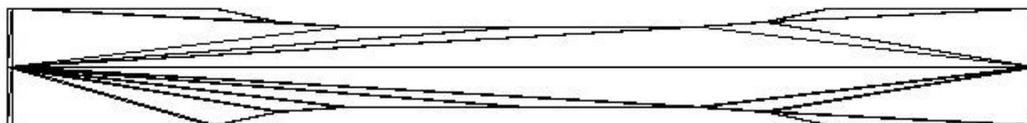
Foram geradas as 3 discretizações citadas na Seção 5.2.2, as características de cada discretização são mostradas na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Características dos .stl gerados com diferentes métodos.

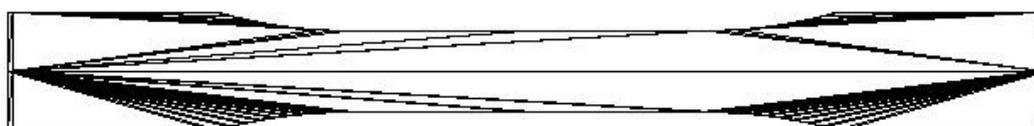
Método	Num. Pontos	Num. Triângulos	Volume (cm <sup>3</sup> )
<i>Save As</i> padrão	40	76	8,429
<i>Save As</i> com refino	96	188	8,396
Ferramenta <i>Tessellation</i>	91181	182364	8,394

Vale ressaltar que quanto maior a quantidade de pontos e triângulos maior será o custo computacional para o fatiador, entretanto este tempo também é relacionado com a complexidade da peça.

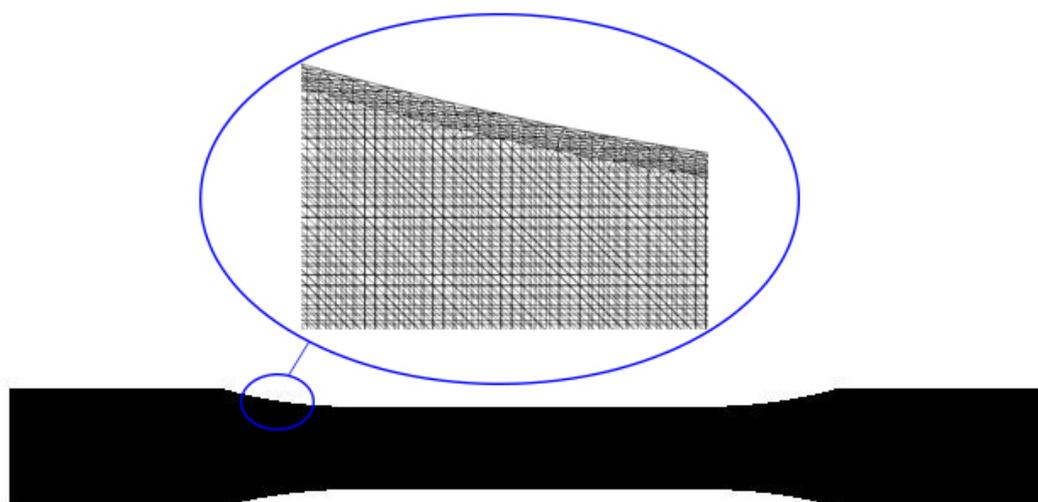
Estas discretizações são mostradas na Fig. 7.1, sendo a Fig. 7.1(a) o primeiro tipo apresentado na Tabela 7.1, Fig. 7.1(b) mostrando o segundo tipo e Fig. 7.1(c) mostra o terceiro e mais refinado tipo.



(a) Discretização feita com *Save As* padrão.



(b) Discretização feita com *Save As* com refino.



(c) Discretização feita com a Ferramenta *Tessellation*.

Figura 7.1 – Discretizações para cada processo adotado.

A discretização mais simples (Fig. 7.1(a)) não atende a forma geométrica do corpo de prova, isto se torna nítido ao analisar de forma comparativa a Fig. 7.2, sendo a zona curva do corpo de prova para tração discretizado (vermelho) e não discretizado (preto).

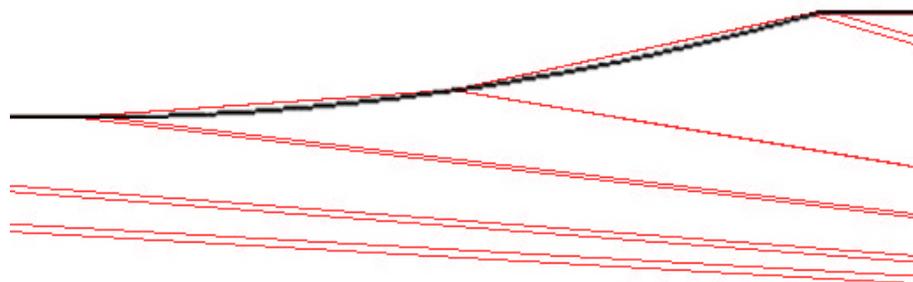


Figura 7.2 – Comparativo da zona curva do corpo de prova para tração discretizado (vermelho) e não discretizado (preto).

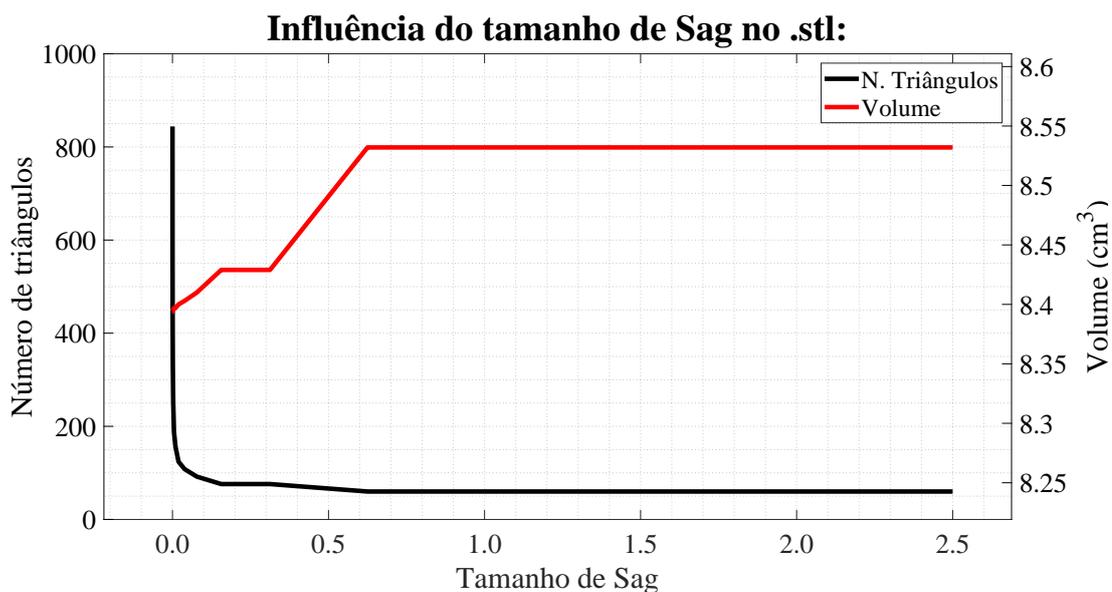
Nota-se que o problema de discretização ocorre em locais no qual a geometria apresenta característica curva, desta forma, geometrias como o corpo de prova para flexão (debatido na Seção 5.3.2, Fig. 5.5) não apresentam divergência volumétrica na discretização mesmo para alto número de *Sag*.

O volume é um dos parâmetros fundamentais para definir a qualidade da geometria, podendo comparar entre o modelo original em CAD e a discretização do arquivo .stl.

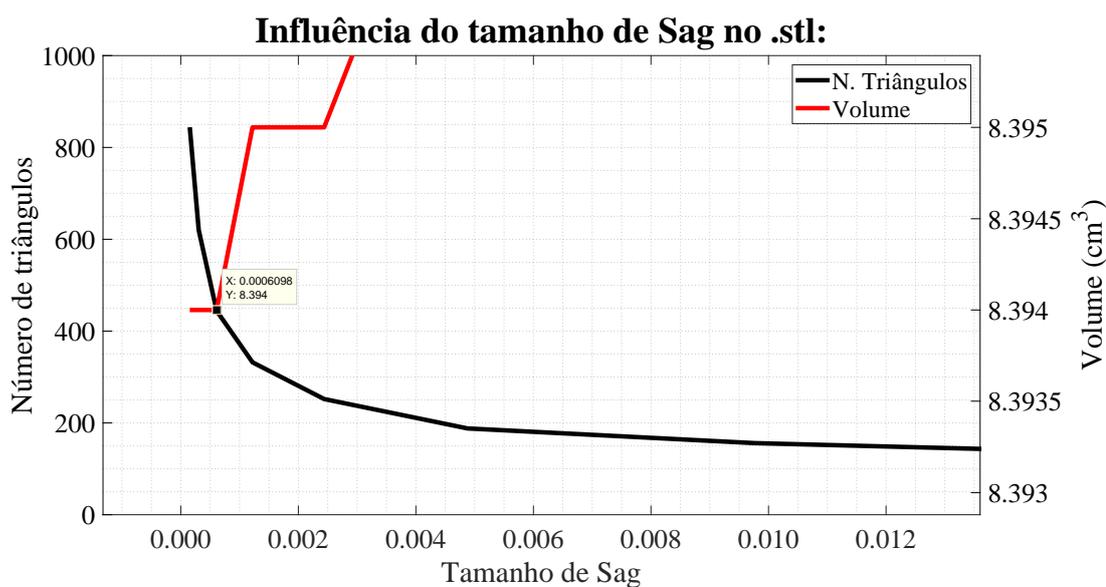
Em CAD o volume original é de  $8,394\text{cm}^3$ . Logo a geometria feita com o *Tessellation* mostrada na Tabela 7.1 é uma boa discretização, entretanto há um maior custo computacional em seu fatiamento.

Em busca do ponto ótimo de discretização do stl é feito uma análise de convergência adotando como principal parâmetro o volume discretizado do corpo de prova, para essa análise é adotado um *Step* automático e variando o numero de *Sag*.

Esta análise de convergência é mostrada na Fig. 7.3. Sendo Fig. 7.3(a) destinada a análise do comportamento geral da curva e Fig. 7.3(b) para verificar o ponto ótimo de discretização.



(a) Gráfico de convergência do arquivo stl.



(b) Zoom em zona da convergência.

Figura 7.3 – Análise de convergência do volume para discretização do stl.

Desta forma a melhor configuração é a que apresenta 444 triângulos com *Sag* de  $6,097E-04$ , esta já oferece uma solução sem erro de discretização considerável em relação ao volume original da peça. Vale ressaltar que quanto menor o número de *Sag* melhor é a discretização, entretanto, o custo computacional para fatiamento aumenta consideravelmente.

### 7.1.2 Caixa para redução das flutuações térmicas

Para manufatura dos corpos de prova utilizados no presente estudo (com exceção do conjunto 1 de parâmetros de impressão) a impressora foi posicionada dentro de uma caixa de

madeira compensada, desta forma, as impressões foram realizadas dentro de um ambiente térmico estável, reduzindo as flutuações térmicas causadas pelo ambiente externo.

Como constatado por Lee e Liu (2018) a variação térmica durante a impressão causa efeitos negativos na propriedade mecânica e na estabilidade dimensional das peças impressas, desta forma isolar a impressora em uma caixa garante melhores propriedades mecânicas e maior uniformidade nos corpos de prova.

A redução das propriedades mecânicas ocorre devido que a maior redução de temperatura do cordão de impressão proporciona um tempo menor para os cordões de impressão aderirem entre si (LEE; LIU, 2018). Este efeito é maior quando há um fluxo de ar forçado incidente na peça.

Figura 7.4 mostra esquemático da caixa com dimensões.

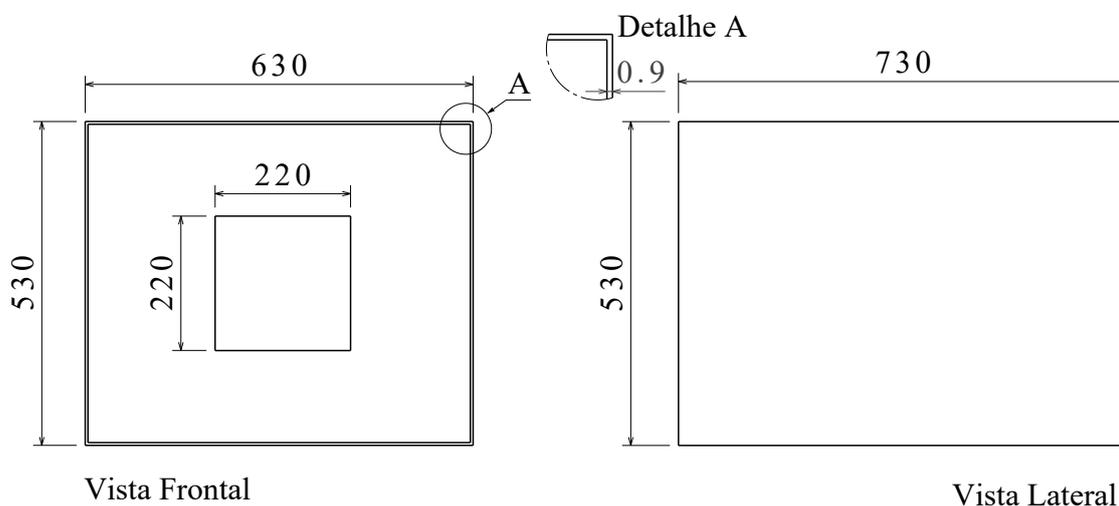


Figura 7.4 – Caixa da impressora.

A Fig. 7.5 relaciona o tempo decorrido de 35min do início da impressão até a estabilidade térmica considerável. É possível notar que a caixa apresenta variação aproximada de  $0,5^{\circ}\text{C}$  em sua estabilidade térmica sendo necessário aproximadamente 30min do início de impressão até este ponto de estabilidade. Ao estabilizar a temperatura média da caixa é de  $36,39^{\circ}\text{C}$ .

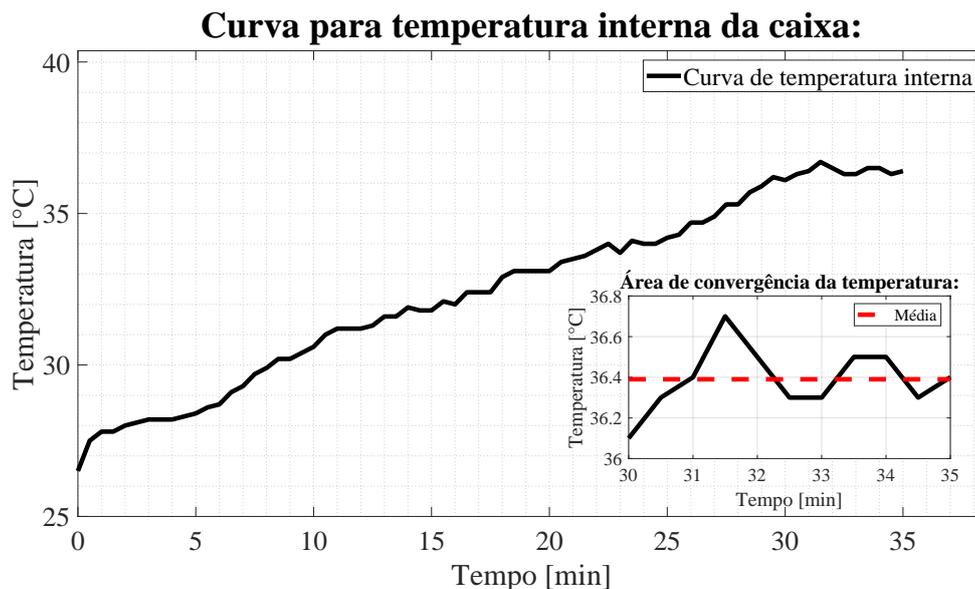


Figura 7.5 – Variação da temperatura durante os 35 primeiros minutos de impressão.

Para determinar a influência do meio externo na temperatura de estabilidade da caixa é utilizado da Fig. 7.6, este gráfico relaciona as temperaturas medidas dentro da caixa com a temperatura medida no ambiente circundante. Vale ressaltar que as medidas foram aferidas em diferentes dias entre os horários de 9:30hrs a 22:00hrs.

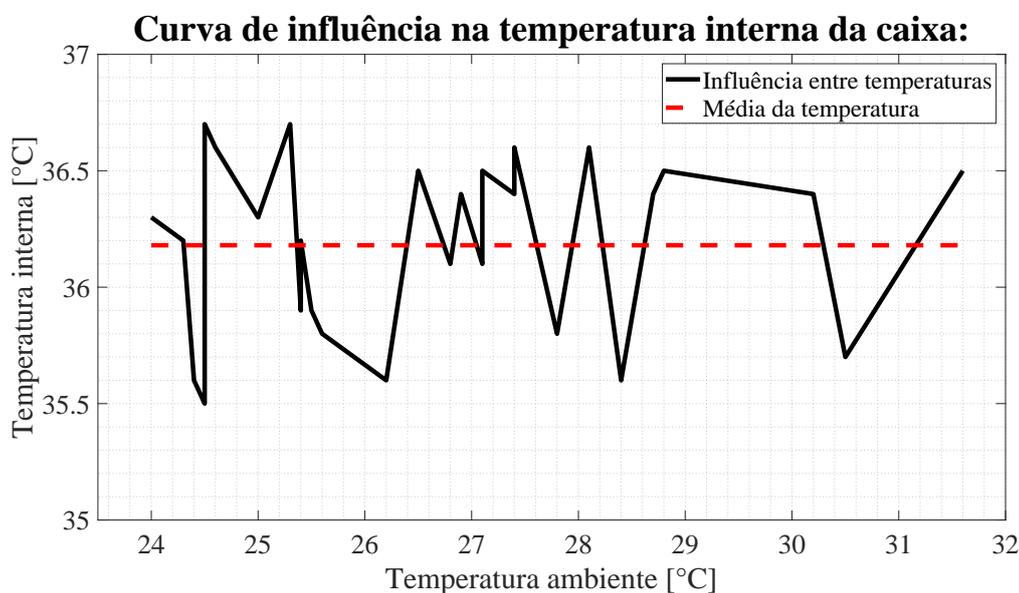


Figura 7.6 – Influência do ambiente externo na temperatura interna da caixa.

É possível notar que mesmo havendo uma variação de 7,60°C na temperatura do ambiente não há variação considerável na temperatura interna da caixa. Nesta avaliação a temperatura interna da caixa possui uma temperatura média de 36,18°C com intervalo de confiança de

0,14°C, este intervalo de confiança está dentro da faixa de temperatura de estabilização apresentado na curva da Fig. 7.5.

### 7.1.3 Entupimentos

O ato de entupir foi separado em três grupos no presente estudo, o primeiro sendo considerado entupimento intermitente, o segundo definido como entupimento constante e o terceiro como entupimento flexível. Suas definições são mostradas abaixo:

- Entupimentos intermitentes: Este é o entupimento no qual entope, mas desentope sem a necessidade de interferência externa;
- Entupimentos constantes: Este é o entupimento no qual entope, mas não desentope sem que seja feito um procedimento externo de desmontagem e desentupimento termomecânico;
- Entupimentos flexíveis: Este é o entupimento no qual não necessariamente o bico extrusor entope, mas em razão do filamento ser flexível este não consegue mais ser empurrado para extrusão. É necessário remover o filamento, mas não há necessidade de remoção do bico.

Durante as impressões houve poucos entupimentos constantes, sendo realizado manutenção preventiva para evita-los. Entretanto com a utilização do filamento de álcool polivinílico (PVA) houve entupimentos intermitente e em sequência entupimentos flexíveis, desta forma para realização dos suportes foi feita impressão utilizando de filamentos feitos de poliestireno de alto impacto (HIPS).

Vale destacar que o entupimento intermitente causado ao utilizar o filamento PVA ocorre devido a baixa capacidade de exercer pressão contínua no bico extrusor, este efeito difere do tipo apontado por [Patanwala et al. \(2017\)](#) no qual o entupimento é causado devido ao tamanho do aditivo, no caso carbono.

Se este aditivo possui micro fibras maiores ou igual ao diâmetro bico, ou caso não haja alinhamento, ou muitas fibras sejam alinhadas e pressionadas a passar pelo bico ao mesmo tempo, estes motivos causam entupimentos intermitentes quando a pressão no tubo de extrusão seja o suficiente para pressionar a fibra a sair do bico ou caso essa pressão não seja atingida causa entupimento constante ([PATANWALA et al., 2017](#)).

O PVA se mostrou funcional ao utilizar peças menores focando testes de calibração como cubos e ângulo de impressão (ambos com dimensões aproximadas de aresta com 20mm), entretanto apresentou a problemática de dobramentos antes da extrusão, causando entupimentos flexíveis ao imprimir peças maiores, como a ponte (debatido na Seção 7.4.3) e painel sanduíche otimizado (Seção ??).

## 7.2 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

Os modelos de otimização topológica foram feitos utilizando os resultados para o conjunto 3 dos parâmetros de impressão, em razão deste conjunto de parâmetros apresentar as melhores propriedades mecânicas.

Desta forma nesta seção é apresentado os resultados obtidos exclusivamente para este conjunto de parâmetros, os resultados e comparações em relação ao demais conjuntos de parâmetros são abordados na Seção 7.2.1.

Na Tabela 7.2 são exibidas as dimensões médias e as estatísticas associadas aos corpos de prova para tração.

Tabela 7.2 – Características dimensionais médias dos grupos de CPT.

<b>Dimensão</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Erro Padrão</b>	<b>Intervalo de Confiança<sup>1</sup></b>	<b>Erro absoluto</b>	<b>Erro Relativo (%)</b>
T (mm)	18,900	0,073	0,037	0,072	0,125	0,66%
WO (mm)	3,177	0,077	0,038	0,075	0,023	0,72%
W (mm)	13,030	0,071	0,041	0,080	0,094	0,72%
LO (mm)	164,826	0,155	0,089	0,175	0,293	0,18%

A Fig. 7.7 mostra o resultado sintetizado no gráfico tensão-deformação, estes resultados são utilizados para montagem do modelo isotrópico na Seção 7.3. Vale ressaltar que a deformação medida pela máquina apresenta divergência do valor medido pelo extensômetro, isto ocorre devido a deslizamentos que o corpo de prova realiza em relação as garras que o segura, para corrigir este deslizamento a deformação da máquina é multiplicada por uma constante menor que 1, o método para obter esta constante é expresso no Apêndice B.

<sup>1</sup> Este intervalo de confiança é de 95%, logo há uma significância de 5%. Estes valores valem para todos os intervalos de confiança abordado neste estudo.

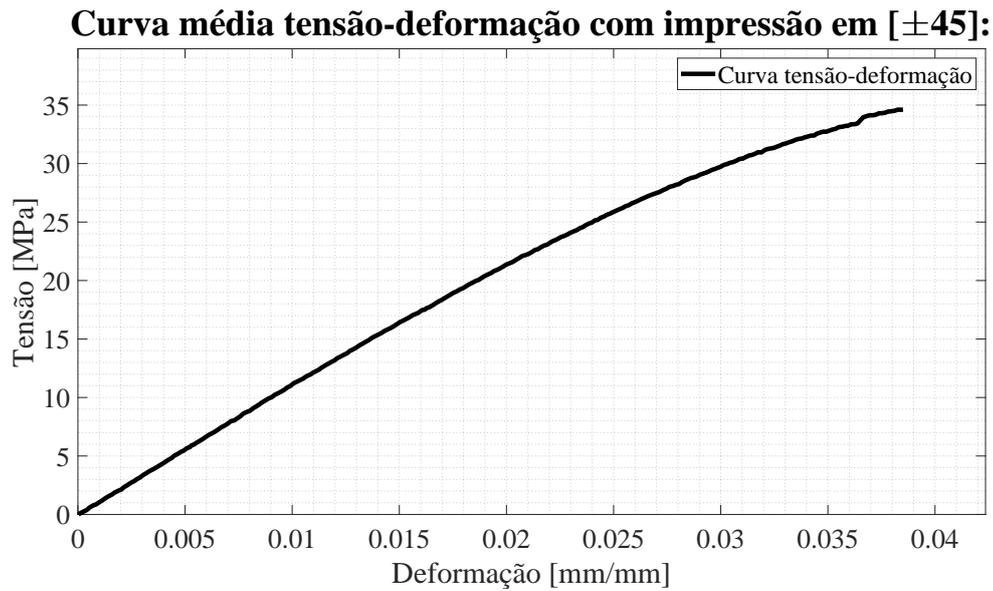
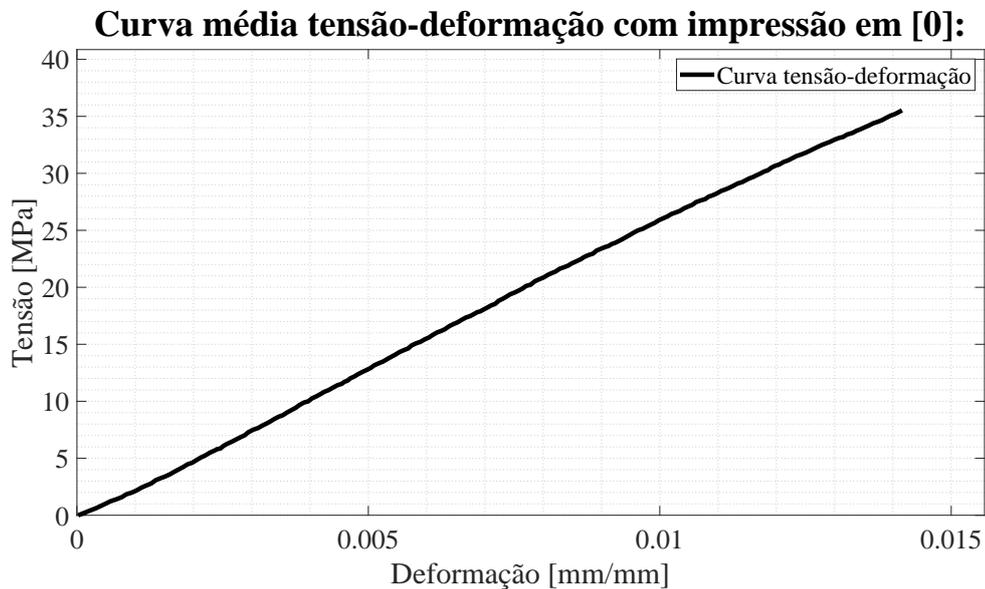
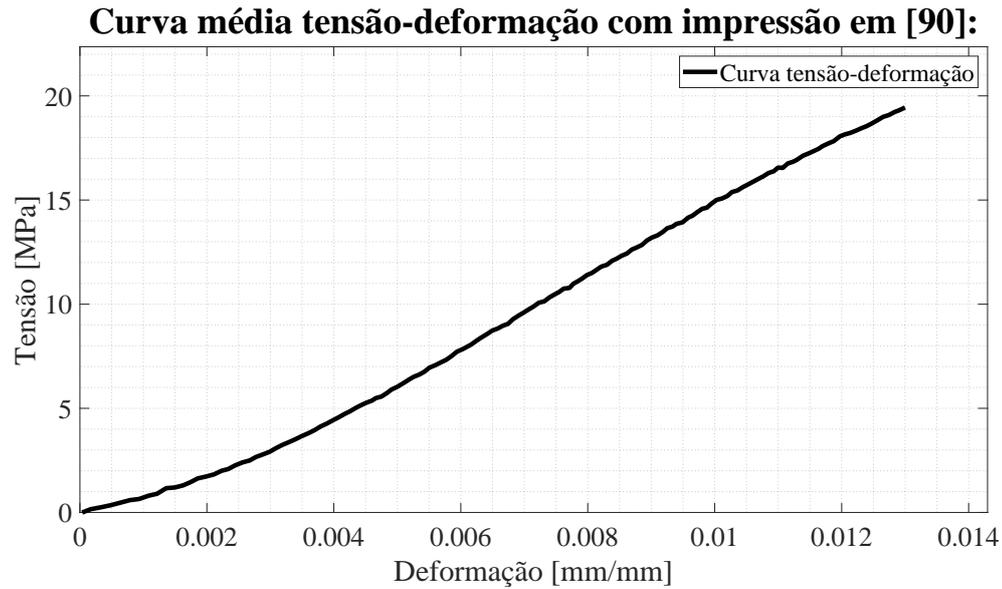


Figura 7.7 – Gráfico tensão-deformação para impressão de PLA em  $[\pm 45]$ .

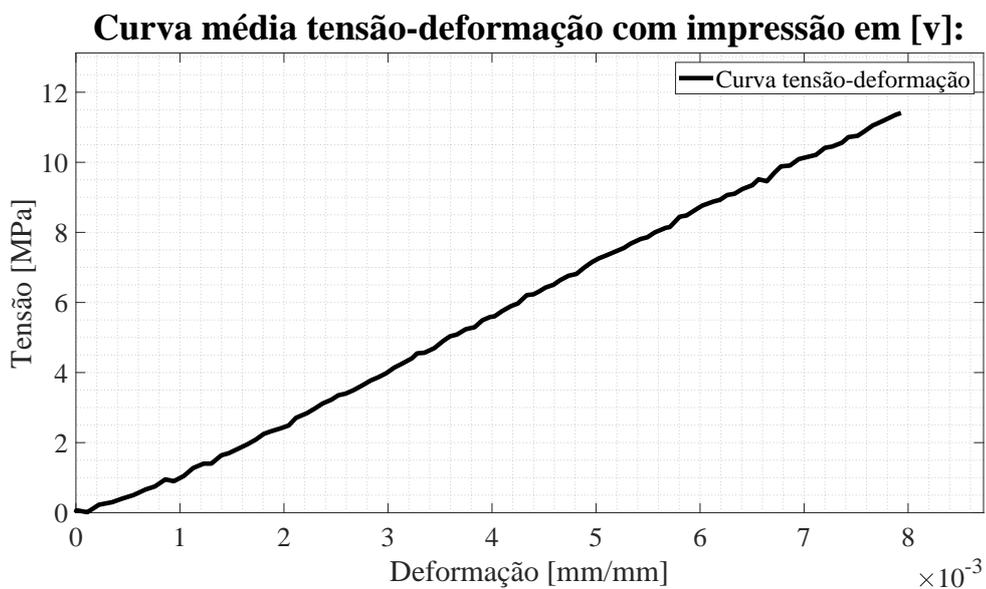
Como explicitado na Seção 5.2.4, para montagem do modelo ortotrópico é realizado ensaio com os sentidos de impressão de  $[0]$ ,  $[90]$  e  $[v]$ , os resultados destes ensaios são explicitados na Fig. 7.8, sendo respectivamente Fig. 7.8(a), Fig. 7.8(b) e Fig. 7.8(c).



(a) Curva tensão-deformação média para fibras orientadas em  $0^\circ$ .



(b) Curva tensão-deformação média para fibras orientadas em 90°.



(c) Curva tensão-deformação média para impressão vertical.

Figura 7.8 – Curva tensão-deformação média e seus desvios padrões para cada material.

As propriedades médias obtidas para os ensaios do conjunto 3 de parâmetros de impressão são mostrados na Tabela 7.3, junto de sua análise estatística.

Tabela 7.3 – Propriedades médias para conjunto 3 dos parâmetros de impressão.

Propriedade	Média	Desvio Padrão	Erro Padrão	Intervalo de confiança
Direção de impressão [ $\pm 45$ ]				
$E$ (GPa)	1,732	0,092	0,037	0,072
$\sigma_{max}$ (MPa)	34,620	2,238	0,913	1,791
$\epsilon_{max}$ (mm/mm)	0,038	0,008	0,003	0,006
Direção de impressão [0]				
$E_1$ (GPa)	2,500	0,123	0,059	0,116
$\sigma_{max}$ (MPa)	35,529	0,407	0,182	0,357
$\epsilon_{max}$ (mm/mm)	0,014	0,007	0,003	0,006
Direção de impressão [90]				
$E_2$ (GPa)	1,806	0,017	0,008	0,017
$\sigma_{max}$ (MPa)	19,440	2,127	1,063	2,084
$\epsilon_{max}$ (mm/mm)	0,012	0,001	0,000	0,001
Direção de impressão [v]				
$E_3$ (GPa)	1,481	0,036	0,025	0,049
$\sigma_{max}$ (MPa)	11,408	1,386	0,980	1,921
$\epsilon_{max}$ (mm/mm)	0,007	0,000	0,000	0,000
Dados gerais				
Massa (g)	8,171	0,000	0,000	0,000
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,973	0,000	—	—

Nota-se que os módulos de elasticidade apresentam diferentes valores dependendo da direção de impressão, resultado semelhante foi encontrado por [Silva \(2018\)](#) no qual analisou de forma majoritária o sentido de impressão em relação a mesa, sendo considerado 3 direções de impressão, chapado, horizontal e vertical. [Silva \(2018\)](#) achou diferentes propriedades mecânicas em função dos sentidos de impressão em conjunto com outros indicativos de comportamento anisotrópico.

A partir da Tabela 7.3, pode-se inferir que o módulo de elasticidade ( $E$ ) apresenta 30,71% de redução em relação módulo longitudinal ( $E_1$ ), em relação ao módulo transversal 1 ( $E_2$ ) o módulo de elasticidade ( $E$ ) apresenta um aumento de 1,53% e em relação ao módulo transversal 2 ( $E_3$ ) apresenta aumento de 25,38%.

O corpos de prova de PLA sofreram fratura frágil, o que já era esperado devido as características do material injetado debatido na Seção 2.3.1, entretanto o valor de  $\epsilon_{max}$  foi reduzido em comparação com o injetado. De acordo com [Kerekes et al. \(2019\)](#) o efeito de falha local frágil pode ser atribuído aos poros e vazios, estes no qual são abordados na Seção 7.2.1.

### 7.2.1 Diferentes parâmetros de impressão

A utilização de diferente parâmetros de impressão não causaram mudanças geométricas consideráveis, desta forma a média demonstrada na Tabela 7.2 são representações válidas inde-

pendente dos parâmetros de impressão. Entretanto, diferentes parâmetros de impressão causam variações na massa e por consequência na densidade da peça, na Tabela 7.4 é mostrado a massa e densidade média para cada conjunto de diferentes parâmetros de impressão.

Tabela 7.4 – Características mássicas médias para cada conjunto de parâmetros de impressão.

Conjunto	Média	Massa (g)			Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	
		Desvio Padrão	Erro Padrão	Intervalo de confiança	Média	Desvio Padrão
Parâmetros 1	7,758	1,13E-04	6,52E-05	1,28E-04	0,924	1,35E-05
Parâmetros 2	7,514	1,55E-04	8,95E-04	1,75E-04	0,895	1,85E-05
Parâmetros 3	8,171	3,76E-04	2,17E-04	4,25E-04	0,973	4,47E-05

A direção de impressão [ $\pm 45$ ] é utilizada como referência para comparação entre os conjuntos de diferentes parâmetros de impressão, a Fig. 7.9 mostra as curvas resultantes para diferentes conjuntos de parâmetros de impressão.

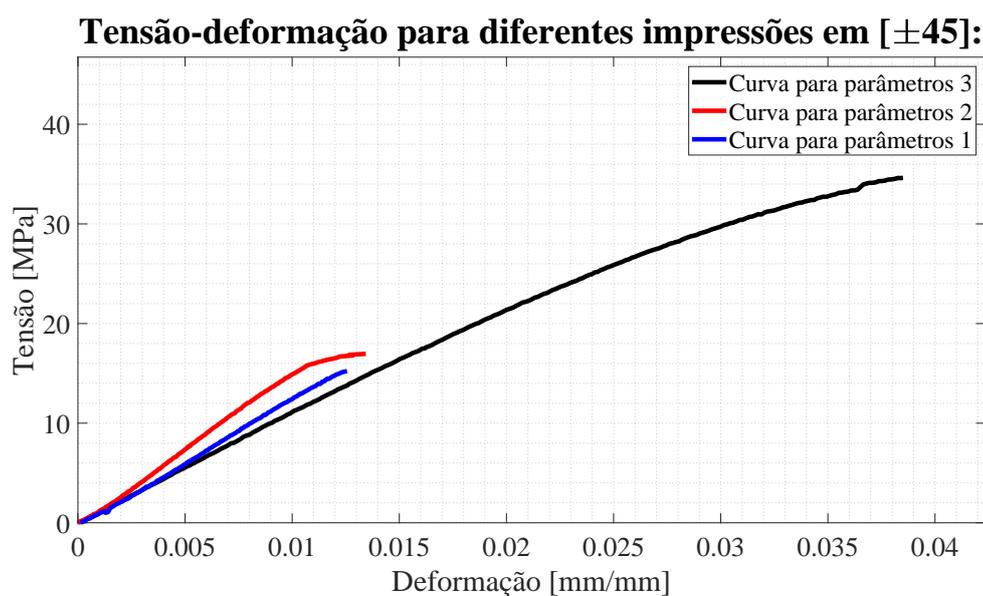


Figura 7.9 – Gráfico tensão-deformação para os 3 conjuntos de impressão em [ $\pm 45$ ].

As propriedades mecânicas obtidas para cada conjunto são reunidas na Tabela 7.5, juntamente de suas análises estatísticas.

Tabela 7.5 – Propriedades médias para diferentes conjuntos dos parâmetros de impressão.

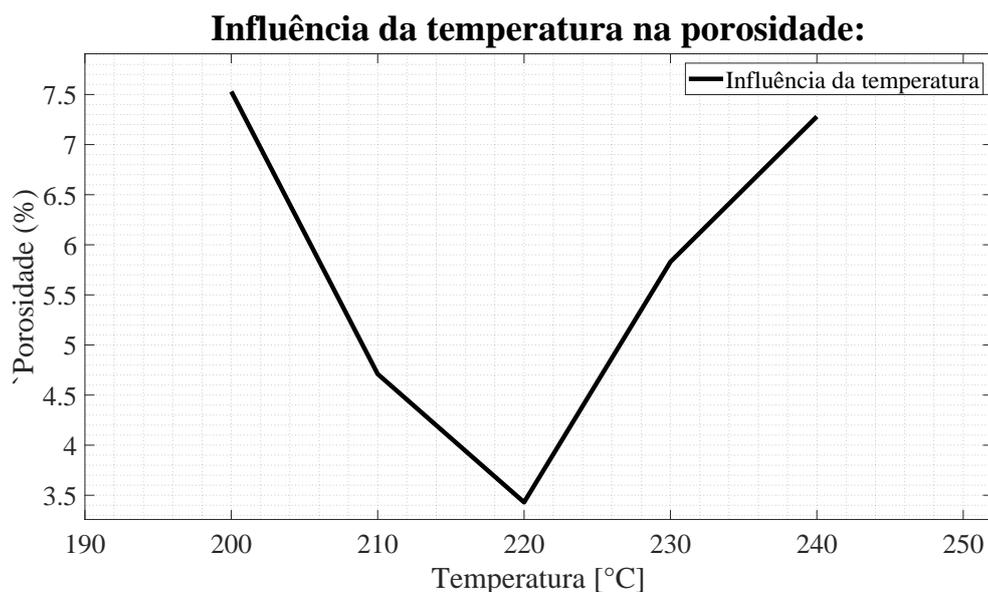
Conjunto	Propriedade	Média	Desvio Padrão	Erro Padrão	Intervalo de confiança
Parâmetros 1	$E_{C1}$ (GPa)	1,181	0,114	0,046	0,091
	$\sigma_{max}$ (MPa)	15,230	2,314	0,944	1,852
	$\epsilon_{max}$ (mm/mm)	0,012	0,002	0,000	0,001
Parâmetros 2	$E_{C2}$ (GPa)	1,421	0,143	0,058	0,114
	$\sigma_{max}$ (MPa)	16,958	2,890	1,179	2,312
	$\epsilon_{max}$ (mm/mm)	0,013	0,001	0,000	0,000
Parâmetros 3	$E_{C3}$ (GPa)	1,732	0,092	0,037	0,072
	$\sigma_{max}$ (MPa)	34,620	2,238	0,913	1,791
	$\epsilon_{max}$ (mm/mm)	0,038	0,008	0,003	0,006

Como o conjunto 3 apresenta maiores propriedades mecânicas estes parâmetros são utilizados para impressão das geometrias otimizadas topologicamente debatidas na Seção 7.4.3 e Seção ??.

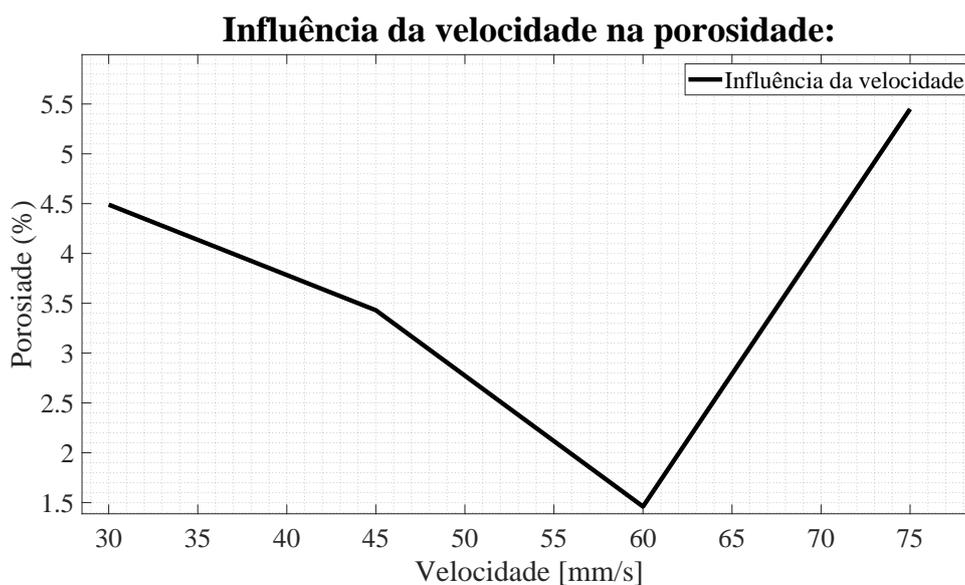
Essas diferenças de propriedades baseadas nos parâmetros de impressão também são investigados por Song et al. (2017), este autor determinou a porcentagem de porosidade (esquemático na Seção 2.3, Fig. 2.4) baseada em 3 principais parâmetros de impressão, sendo estes, altura da camada, temperatura de extrusão e velocidade de impressão<sup>2</sup>.

Song et al. (2017) analisou o resultante da variação da temperatura de extrusão de 200°C até 240°C e velocidade de impressão de 45mm/s até 150mm/s. Seus resultados são sumarizados na Fig. 7.10, sendo Fig. 7.10(a) para porosidade em função da temperatura e Fig. 7.10(b) para porosidade em função da velocidade (há temperatura constante de 220°C).

<sup>2</sup> No presente estudo não é considerado a variação da altura da camada como um parâmetro variável, logo os resultados do estudo conduzido por Song et al. (2017) são resumidos a 2 parâmetros principais, temperatura de extrusão e velocidade de impressão.



(a) Porosidade da peça impressa em função da temperatura de impressão.



(b) Porosidade da peça impressa em função da velocidade de impressão.

Figura 7.10 – Variação da porosidade em função da velocidade e temperatura de impressão.

Vale ressaltar que quanto menor o grau de porosidade do material impresso, maiores suas propriedades mecânicas, com isso, no estudo de [Song et al. \(2017\)](#), as melhores propriedades mecânicas são obtidas para porosidade de 1,46%, produzida com temperatura de extrusão de 220°C e velocidade de impressão de 60mm/s, estes parâmetros representam a combinação das curvas apresentadas na [Fig. 7.10](#).

Estas configurações representam o conjunto 3 de parâmetros de impressão utilizado neste estudo, que por sua vez também apresenta as melhores propriedades mecânicas, confirmando o estudado por ([SONG et al., 2017](#)).

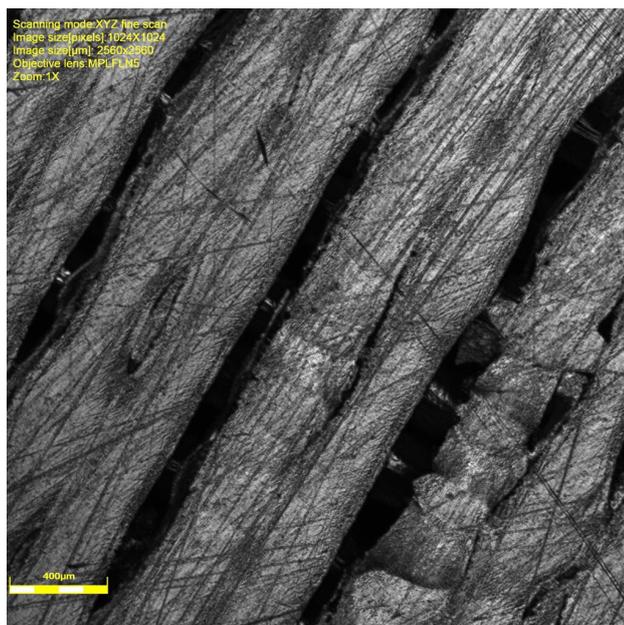
Resultado semelhante foi obtido por [Ribeiro \(2019\)](#), no qual observou melhoria de 4,38% das propriedades médias ao aumentar a temperatura de 200°C para 215°C, mas mantendo a mesma velocidade de impressão.

Ao analisar os corpos de prova impressos utilizando microscópio é possível localizar as zonas de vazios no qual afetam as propriedades mecânicas.

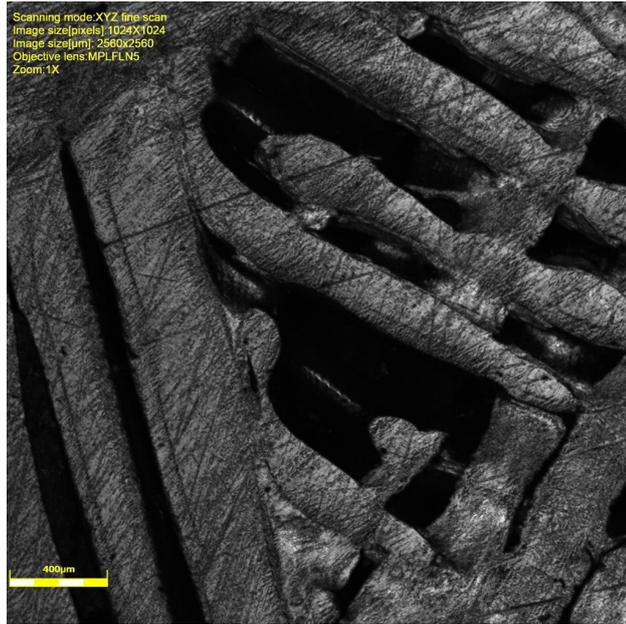
A Fig. 7.11 demonstra os vazios (zonas escuras) e sulcos encontrados nos corpos de prova impresso, sendo Fig. 7.11 vazios entre os cordões de impressão no meio do corpo de prova, estes apresentam distanciamento constante entre cordões.

Fig. 7.11(b) mostra os vazios localizado no canto do corpo de prova, este local de vazio é o encontro entre duas das paredes da peça com o preenchimento interno.

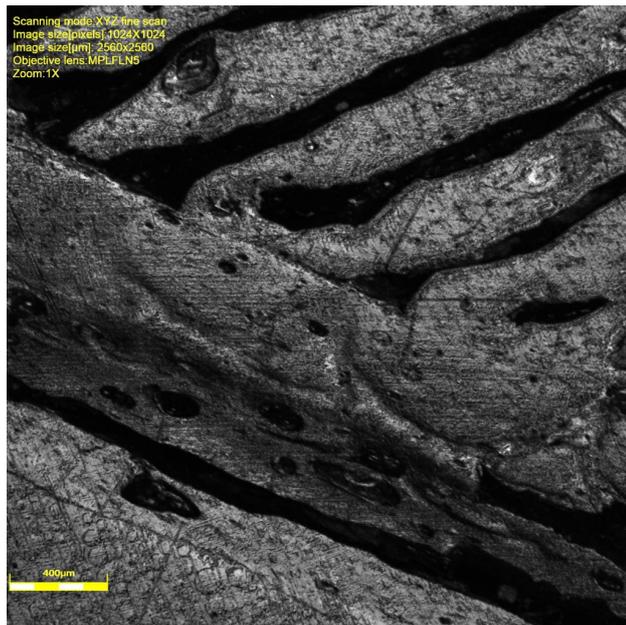
Figura 7.11(c) exibiu em principal os vazios entre a conexão da parede externa com o preenchimento interno ao cordão de impressão, também há vazios entre as paredes externas e vazios entre os cordões de impressão e Fig. 7.11(d) mostra os sulcos entre as camadas causado pelo processo de impressão.



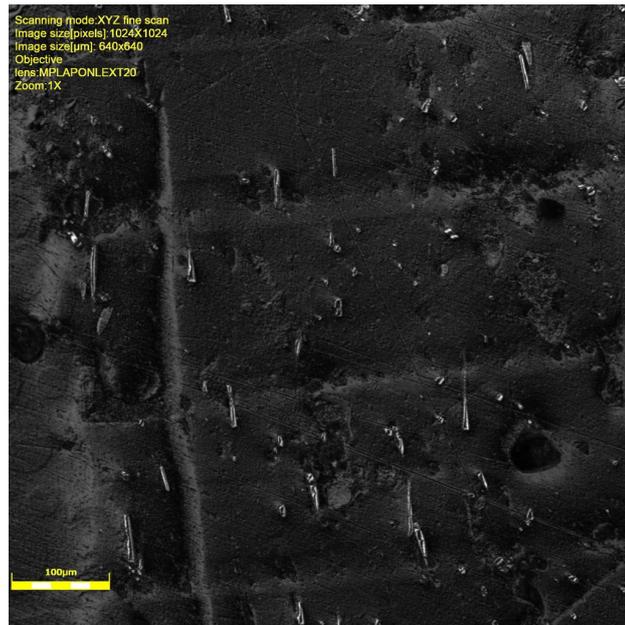
(a) Vazios entre os cordões de impressão.



(b) Vazios na ligação entre os cantos da impressão.



(c) Vazios entre as paredes e o preenchimento, entre os cordões de impressão e entre as paredes.



(d) Sulcos entre as camadas de impressão.

Figura 7.11 – Zonas de vazio e sulcos nos corpos de prova.

O material da Fig. 7.11(d) não é PLA puro, este é um compósito com fibras curtas de PLA com carbono, apresentar as propriedades deste compósito foge do escopo deste estudo, mas vale ressaltar que os sulcos são provenientes do processo de fabricação, logo são independentes do material utilizado.

Desta forma há o indicativo da presença de vazios, sulcos e poros nas peças, sendo sua fabricação suscetível à variação do cordão de impressão. Estes defeitos tem causa inerente ao processo de fabricação, sendo indicado por [Song et al. \(2017\)](#), [Kerekes et al. \(2019\)](#), [Turner e Gold \(2015\)](#) como a causa principal da redução de propriedades mecânicas de peças impressas.

## 7.3 DIFERENTES MODELOS DO MATERIAL IMPRESSO

### 7.3.1 Modelo isotrópico

A consideração de material isotrópico é feita com as propriedades obtidas com as direções de impressão de  $[\pm 45]$ , estas propriedades são reunidas no Quadro 7.1. Como explicitado na Seção 7.2.1, cada modelo é referente a um conjunto de parâmetros de impressão.

Esta consideração foi feita em razão do sentido de impressão em  $\pm 45$  ser o padrão dos softwares de fatiamento.

Quadro 7.1 – Propriedades utilizadas para construção dos modelos isotrópicos.

Modelo	Módulo de elasticidade	Coefficiente de Poisson	Módulo de cisalhamento
1	1,181	0,396	0,423
2	1,421		0,509
3	1,732		0,620

O modelo foi feito em acordo com o explicitado na Seção 6.2.1 (Fig. 6.3). Este domínio tem que ser discretizado como explicitado na Seção 4.2.1, para definir se a discretização não afeta os resultados de forma significativa é montado a análise de convergência baseado no refino do tipo h, este resultado pode ser vista na Fig. 7.12.

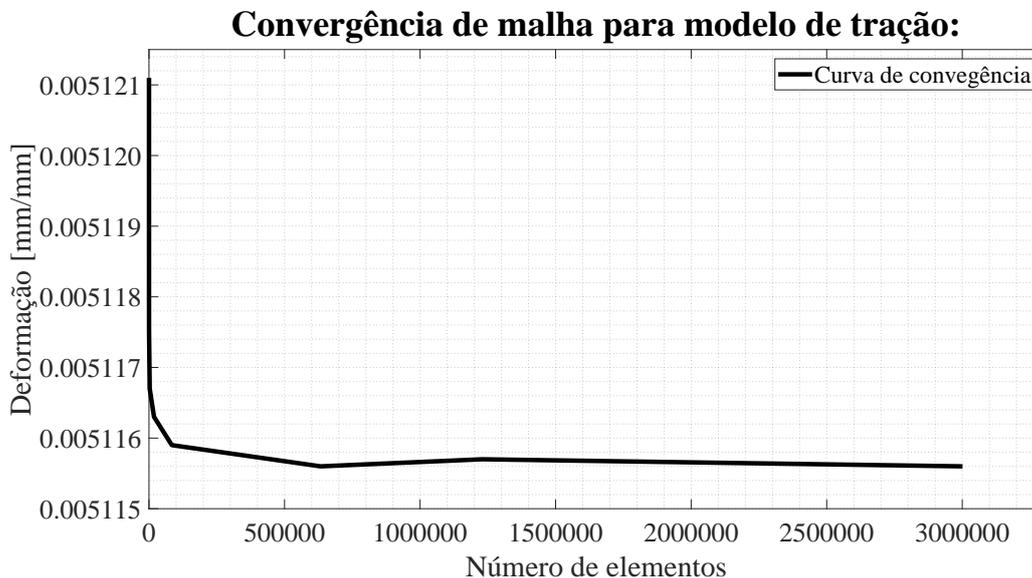
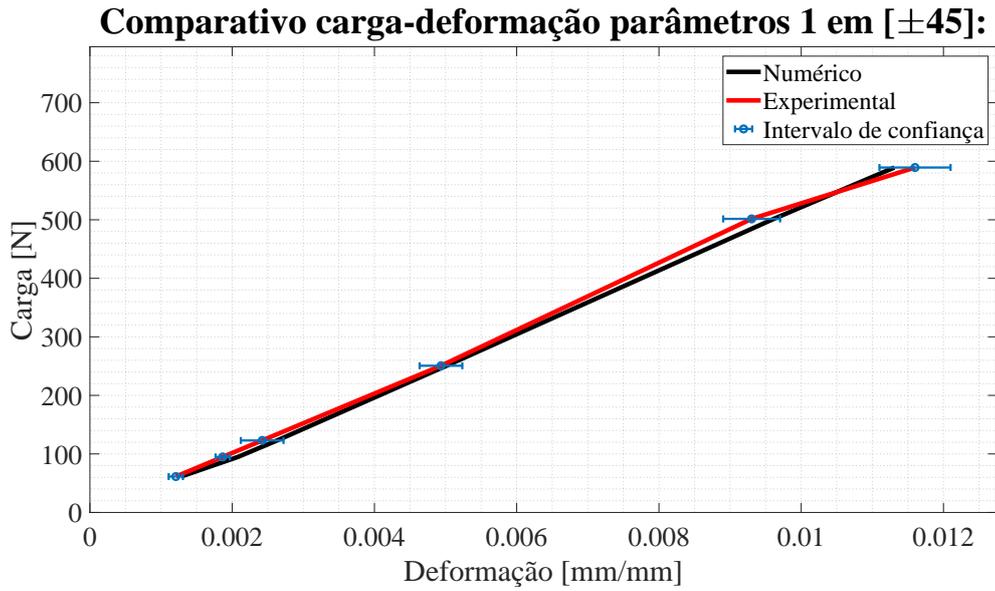


Figura 7.12 – Gráfico de convergência para modelo de tração.

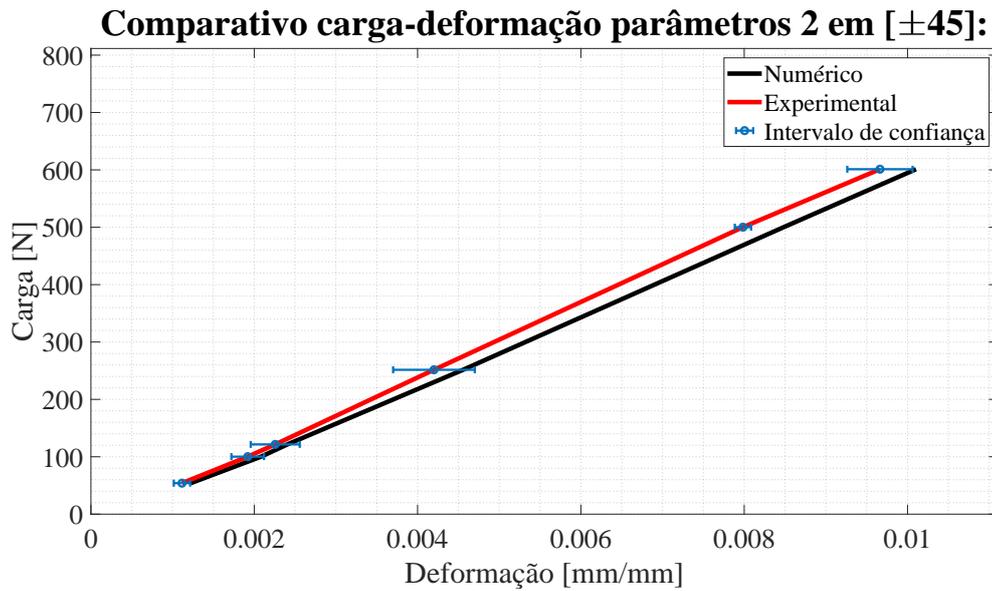
Para comparativo dos resultados foi gerado a curva tensão-deformação numérica, sendo utilizado como parâmetro de entrada as forças atuantes no resultado experimental em conjunto com os dados mostrados no Quadro 7.1.

Na Fig. 7.14 é compilado os resultados obtidos para cada modelo, sendo Fig. 7.13(a) representando o modelo 1, Fig. 7.14(b) representando modelo 2 e a representação do modelo 3 está disponível na Fig. 7.14(c).

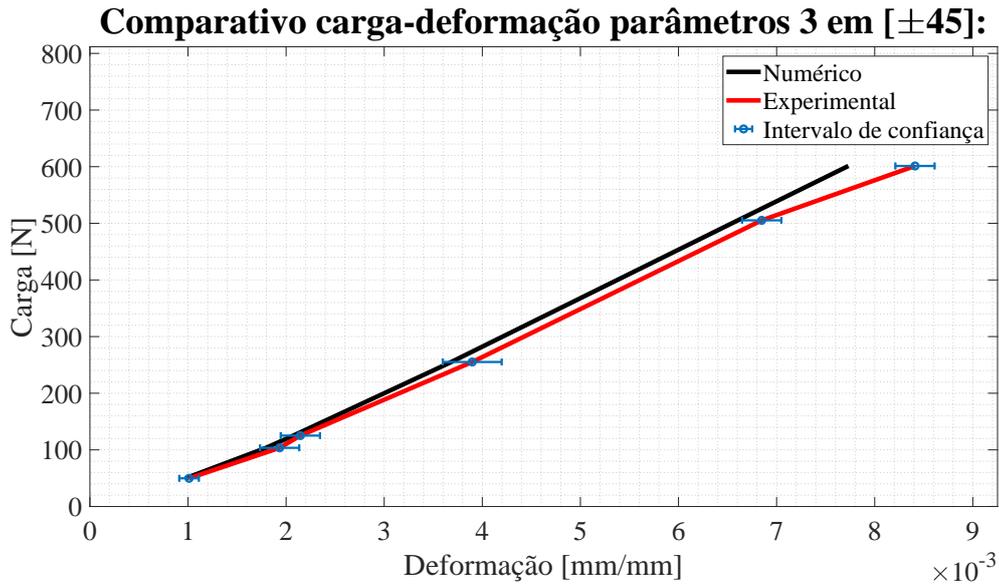


(a) Curva carga-deformação comparativo para modelo 1.

Figura 7.13 – Campo de tensão obtido via ANSYS e local de tensão máxima.



(b) Curva carga-deformação comparativo para modelo 2.



(c) Curva carga-deformação comparativo para modelo 3.

Figura 7.14 – Curvas carga-deformação comparativo entre numérico e experimental para diferentes modelos.

O modelo em flexão foi realizado para os materiais do conjunto 1 e 3, com a finalidade de testar a previsibilidade do modelo, sendo este isotrópico ou ortotrópico. O modelo é feito em acordo com o explicitado na Seção 6.2.2 (Fig. 6.5), sua discretização também é avaliada através da análise de convergência baseado no refino do tipo h. Este resultado pode ser vista na Fig. 7.15.

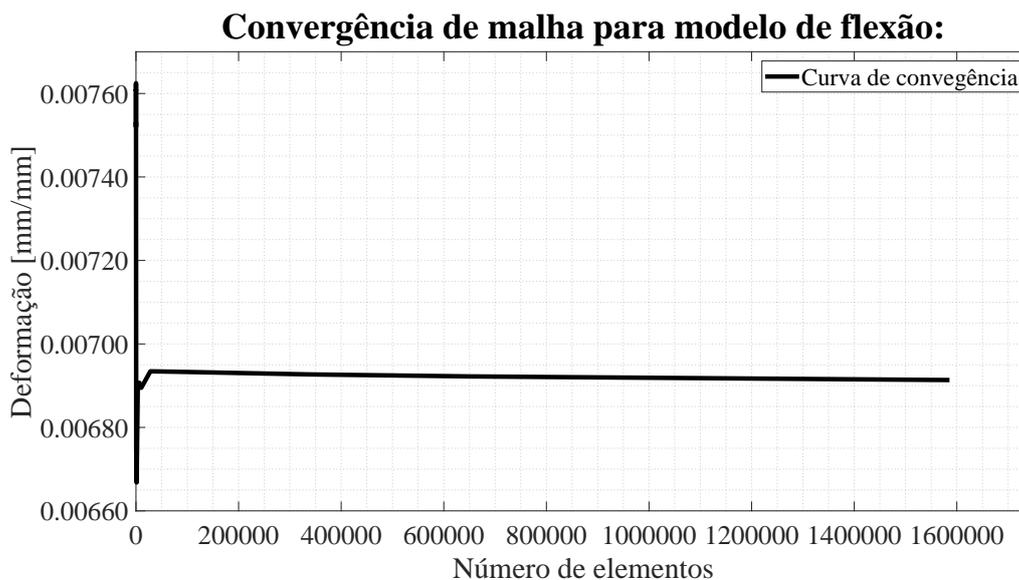


Figura 7.15 – Gráfico de convergência para modelo de flexão.

Como referência foi adotado os resultados obtidos com ensaios. Tabela 7.6 mostra as dimensões de cada corpo de prova para flexão. Vale destacar que estas medidas médias são para

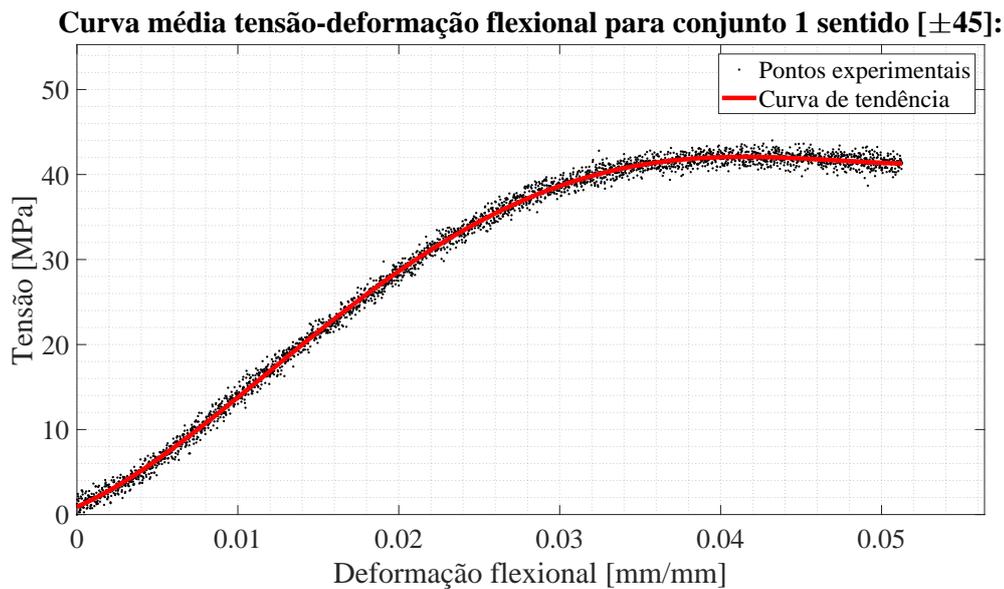
todos os conjuntos e direções de impressão debatidos neste estudo.

A partir dos dados obtidos na Seção 7.2, Tabela 7.2, é possível prever via CAD a massa resultante dos corpos de prova para flexão, sendo obtido o valor de 5,0233 g. Este valor é usado como referência para parâmetros de erro absoluto e erro relativo da massa na Tabela 7.6.

Tabela 7.6 – Características dimensionais médias dos corpos de prova de flexão.

Dimensão	Média	Desvio Padrão	Erro Padrão	Intervalo de Confiança	Erro Absoluto	Erro Relativo (%)
L (mm)	12,675	0,044	0,050	0,098	0,288	3,77
E (mm)	3,084	0,086	0,025	0,049	0,052	0,41
C (mm)	126,950	0,069	0,040	0,078	0,129	0,10
Massa (g)	4,998	0,000	0,000	0,000	0,057	1,15

Os resultados obtidos com os ensaios de flexão de referência para modelo isotrópico são mostrados na Fig. 7.16, sendo Fig. 7.16(a) para conjunto 1 e Fig. 7.16(b) para conjunto 3, ambos com direção de impressão de  $[\pm 45]$ .



(a) Curva tensão-deformação em flexão para conjunto de parâmetros 1 com fibras orientadas em  $\pm 45^\circ$ .

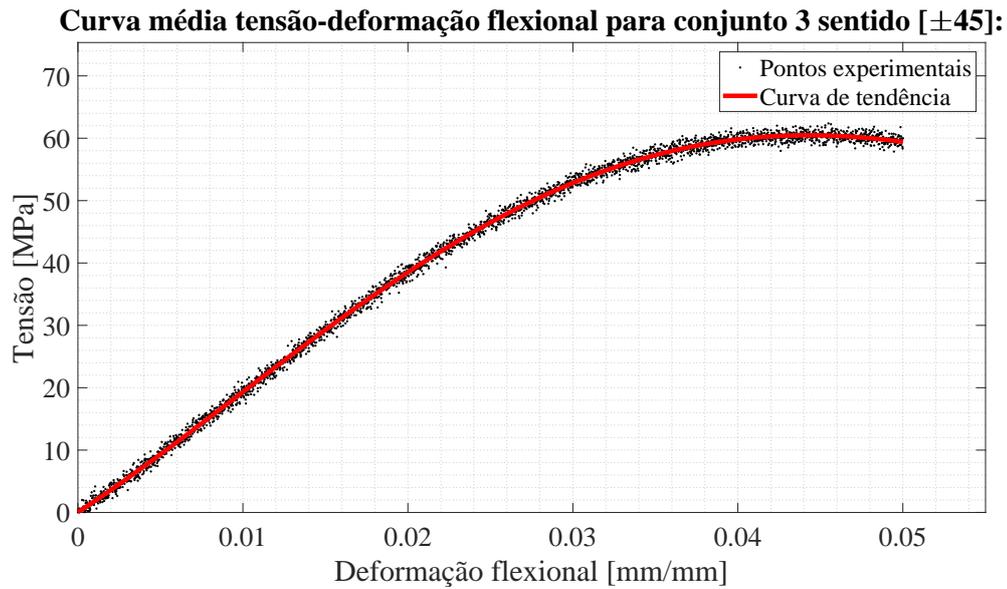
(b) Curva tensão-deformação em flexão para conjunto de parâmetros 3 com fibras orientadas em  $\pm 45^\circ$ 

Figura 7.16 – Curvas tensão-deformação em flexão para diferentes conjuntos de parâmetros de impressão e diferentes orientações das fibras.

A obtenção das curvas de tendência mostradas na Fig. 7.16 são realizadas através da ferramenta *Curve Fitting* do MATLAB. Essa a partir das médias obtidas regressão tem a capacidade de descrever 99,80% dos dados experimentais (*R-square* de 0,9980).

As propriedades obtidas para ensaio de flexão são mostradas na Tabela 7.7.

Tabela 7.7 – Propriedades obtidas para ensaio de flexão.

Propriedade	Média	Desvio Padrão	Erro Padrão	Intervalo de confiança
Direção de impressão $[\pm 45]$ conjunto 1				
$E_{bC1}$ (GPa)	1,412	0,231	0,094	0,185
$\sigma_{fmax}$ (MPa)	44,016	2,579	1,053	2,063
$P_{max}$ (N)	74,534	4,367	1,783	3,494
$D_{max}$ (mm)	5,899	0,001	0,000	0,000
$\epsilon_{fmax}$ (mm/mm)	0,043	0,000	0,000	0,000
Direção de impressão $[\pm 45]$ conjunto 3				
$E_{bC3}$ (GPa)	1,903	0,172	0,099	0,194
$\sigma_{fmax}$ (MPa)	62,376	1,593	0,919	1,802
$P_{max}$ (N)	105,623	2,698	0,980	1,928
$D_{max}$ (mm)	6,211	0,001	0,000	0,000
$\epsilon_{fmax}$ (mm/mm)	0,045	0,000	0,000	0,000

A partir da comparação entre os resultados para módulo de elasticidade mostrados na Tabelas 7.3 (para tração) e Tabela 7.7 (para flexão) ressalta-se que há diferença percentual entre

os módulos de elasticidade obtidos em flexão e em tração. Há uma diferença de 18,47% entre  $E$  e  $E_b$ , uma diferença de 11,56% entre  $E_1$  e  $E_{b1}$  e 3,57% de diferença entre  $E_2$  e  $E_{b2}$ .

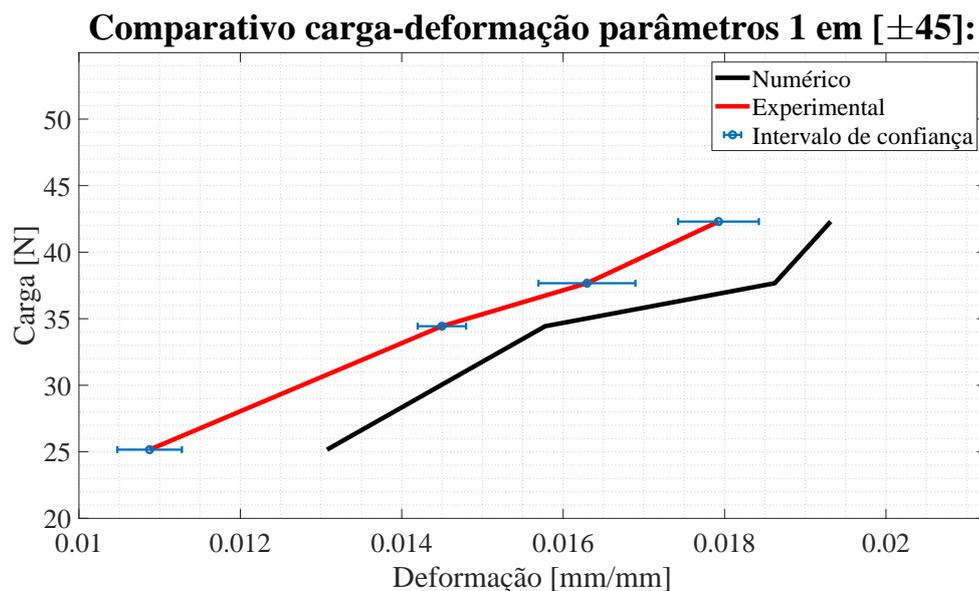
Um dos principais fatores que influenciam nessa diferença é que muitas das vezes o ensaio de flexão pode não estar submetido a configuração de flexão pura, desta forma, acaba por sofrer efeitos de carga concentrada (CARVALHO; DUARTE, 2000).

Para averiguar se a configuração do ensaio é de flexão pura foi feito uso da equação de correção da tensão debatida na Seção 5.3.2, Eq. 5.6. Ao aplicar essa equação obtêm-se uma diferença média entre as tensões de 2,65%, logo pode-se considerar que o ensaio é feito com configuração de flexão pura, desta forma a Eq. 5.5a, se torna uma boa abordagem para cálculo da Tensão.

Desta forma o maior indicativo da diferença entre módulos de elasticidade é devido ao efeito de que materiais anisotrópicos e/ou heterogêneos possuem módulo de elasticidade em tração diferente do módulo de elasticidade em flexão (OTANI; PEREIRA, 2014).

Como debatido na Seção 3.2 é esperado uma variação direcional nas propriedades devido a anisotropia. Pode-se atribuir a diferença entre módulos de elasticidade como sendo sinais da anisotropia inerente ao processo de fabricação do material. O que é indicativo da necessidade de modelos nos quais considere estes fatores anisotrópicos.

Nas simulações os valores de tensão e deformação são medidos no ponto mais externo da face inferior (face tracionada). O comparativo é exibido na Fig. 7.17, sendo Fig. 7.17(a) para modelo 1 com impressão em  $[\pm 45]$  e os resultados para impressão do conjunto 3 em  $[\pm 45]$  são exibidos na Fig. 7.20(a).



(a) Curva carga-deformação comparativo para modelo 1 em flexão com fibras orientadas em  $\pm 45^\circ$ .

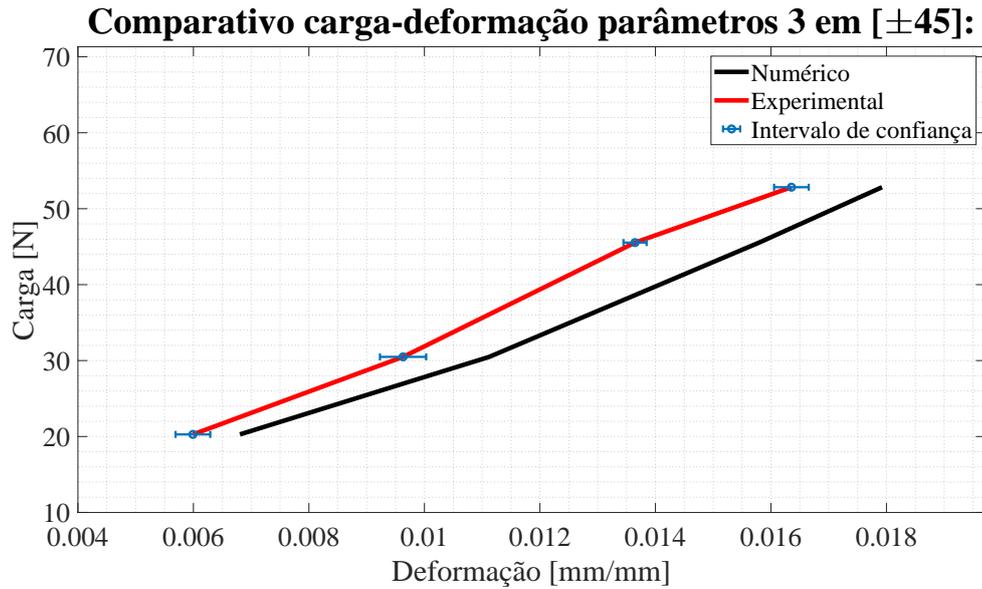
(b) Curva carga-deformação comparativo para modelo 3 em flexão com fibras orientadas em  $\pm 45^\circ$ 

Figura 7.17 – Curvas carga-deformação comparativo entre numérico e experimental para diferentes modelos em flexão com diferentes orientações das fibras.

Desta forma pode-se analisar as diferenças entre cada modelo e avaliar a previsibilidade da consideração de material isotrópico, estes comparativos são exibidos na Tabela 7.8 através da diferença percentual média.

Tabela 7.8 – Resultados percentuais para modelos isotrópicos em tração e flexão.

Conjunto	Diferença média
Ensaio de tração vs modelo isotrópico para tração	
Parâmetros 1	2,35%
Parâmetros 2	5,40%
Parâmetros 3	6,10%
Ensaio de flexão vs modelo isotrópico para flexão	
Parâmetros 1	11,36%
Parâmetros 3	10,45%

O modelo de material isotrópico homogêneo é uma boa aproximação inicial, mas uma vertente promissora levantada por Luca (2017) é a necessidade de desenvolver um conjunto de modelos para descrever e prever o comportamento mecânico das estruturas fabricadas com impressora 3D.

Entretanto Matsuzaki et al. (2016) destaca que a distribuição irregular do cordão de impressão (esquematizado na Seção 2.3, Fig. 2.5) e a existência de vazios (esquematizado na Seção 2.3, Fig. 2.4) podem exigir uma consideração especial durante processos mais avançados de modelagem numérica. Vale ressaltar que os vazios foram encontrados e exibidos na Fig. 7.11.

Entretanto, nota-se da Tabela 7.3 que os módulos de elasticidade sofrem grande influência direcional, logo, mesmo sendo uma consideração inicial válida, a consideração de material isotrópico acaba por se tornar uma simplificação aplicada em poucos casos, como demonstrado na Tabela 7.8. Este modelo demonstrou funcionalidade em distribuições de cargas longitudinais.

### 7.3.2 Modelo ortotrópico

A partir do debatido e visando os pontos levantados por Luca (2017) e Matsuzaki et al. (2016) é montado um modelo mais preciso, sendo uma aproximação ortotrópica com a premissa de que este possui  $\nu$  independente dos parâmetros de impressão e constante para todas as direções principais e no qual é um material isotrópico para cada direção em separado.

As propriedades obtidas em cada ensaios para o conjunto 3 de parâmetros de impressão estão sumarizadas na Tabela 7.3, estas são utilizadas como parâmetros de entrada para cálculo das demais propriedades do modelo ortotrópico, os valores das propriedades resultantes são apresentados na Tabela 7.9.

Tabela 7.9 – Propriedades calculadas para modelo ortotrópico.

Propriedade	Média
Modelo ortotrópico 2	
$G_{12}$ (GPa)	0,820
$G_{23}$ (GPa)	0,399
$G_{31}$ (GPa)	0,393
Modelo ortotrópico 3	
$G_{12}$ (GPa)	0,895
$G_{23}$ (GPa)	0,647
$G_{31}$ (GPa)	0,530

O valor de  $\nu$  foi obtido através dos ensaios com o conjunto 1 de parâmetros de impressão (debatidos na Seção 7.2.1) e como debatido na Seção 1.5 este valor é adotado para todos os conjuntos de parâmetros de impressão independentes da direção.

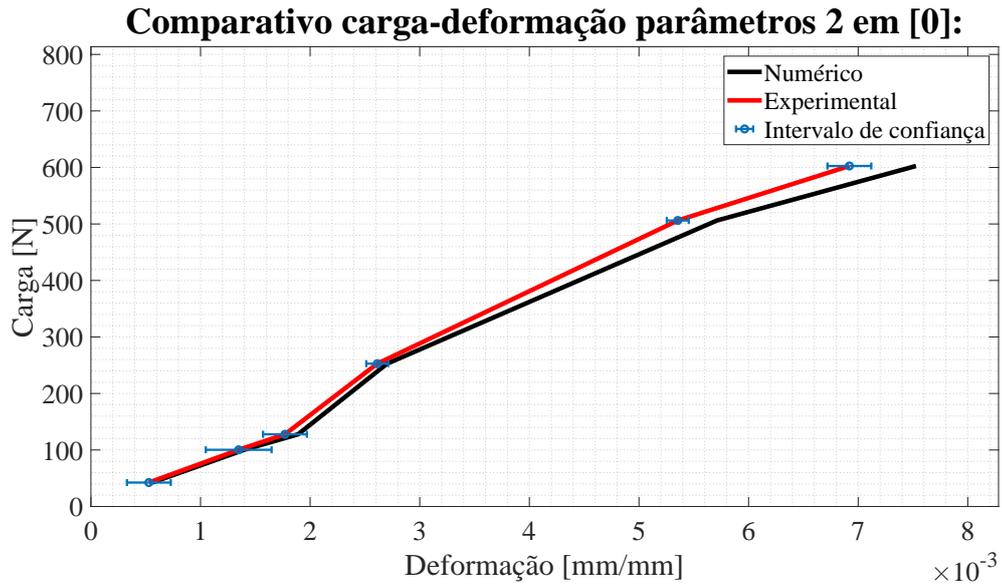
O valor de  $G$  é calculado para cada direção utilizando as relações apresentadas no Quadro 3.2, logo, é utilizado as relações de  $\nu$  em conjunto com  $E$ ,  $E_1$ ,  $E_2$  e  $E_3$  para cada direção em separado de cada conjunto de parâmetros de impressão.

As propriedades utilizadas para composição de cada modelo ortotrópico são sumarizadas no Quadro 7.2.

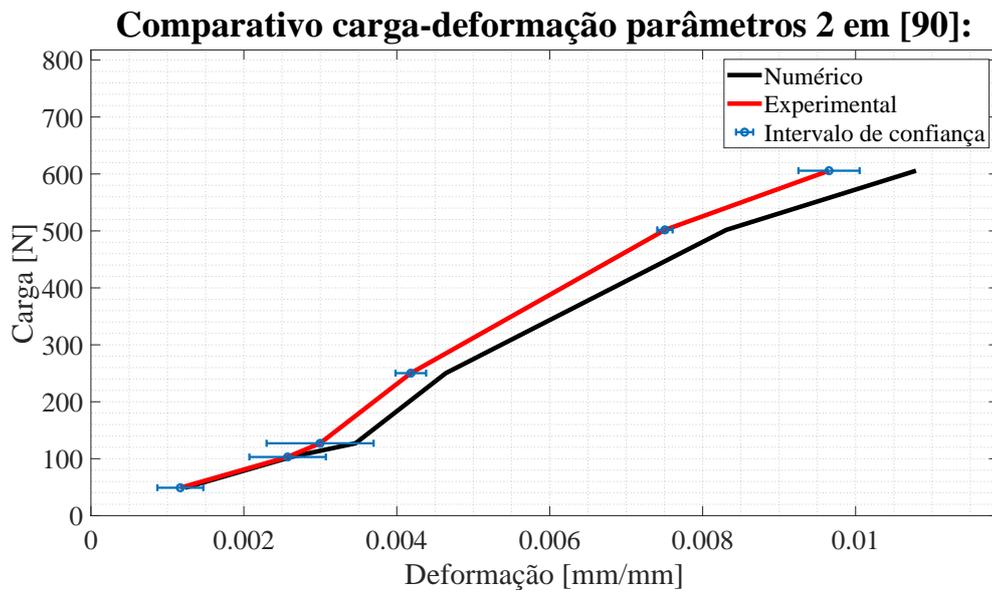
Quadro 7.2 – Propriedades utilizadas para construção dos modelos ortotrópico.

<b>Modelo</b>	<b>Direção</b>	<b>Módulo de elasticidade</b>	<b>Coefficiente de Poisson</b>	<b>Módulo de cisalhamento</b>
2	[0]	2,290	0,396	0,820
	[90]	1,113		0,399
	[v]	1,098		0,393
3	[0]	2,500		0,895
	[90]	1,806		0,647
	[v]	1,481		0,530

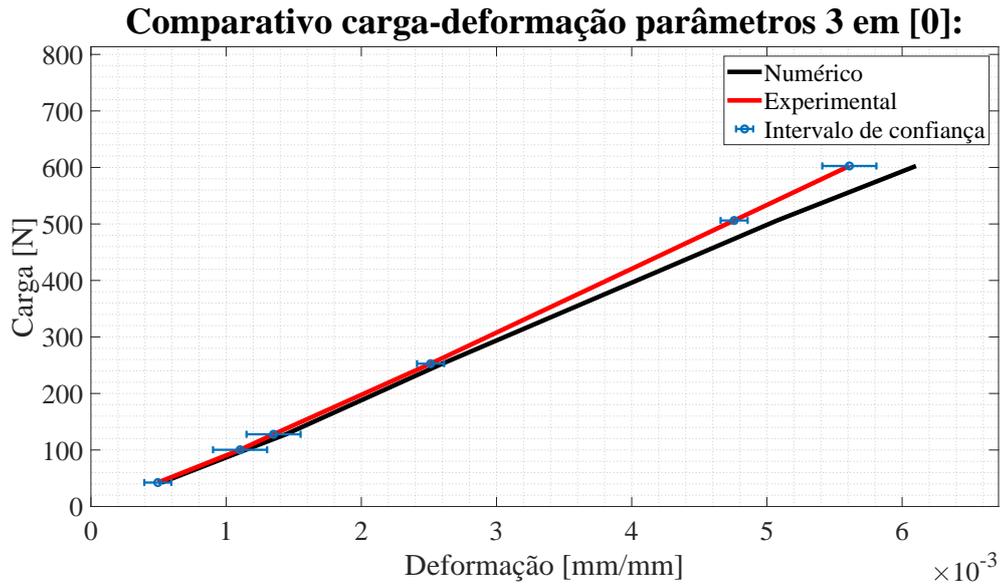
Na Fig. 7.18 mostra os resultados comparados entre tração numérico e tração experimental para os dados obtidos com conjunto de parâmetros 3 nas direções de [0] (Fig. 7.18(c) e [90] (Fig. 7.18(d)) e nas direções [0] (Fig. 7.18(a)) e [90] (Fig. 7.18(b)) para conjunto de parâmetros de impressão 2.



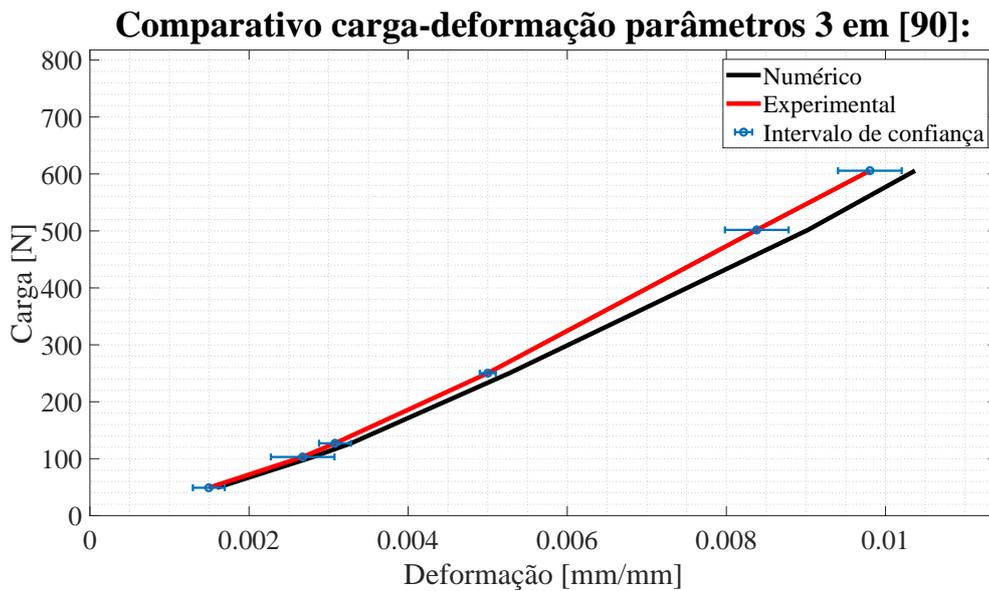
(a) Curva carga-deformação em flexão para conjunto de parâmetros 2 com fibras orientadas em 0°.



(b) Curva carga-deformação em flexão para conjunto de parâmetros 2 com fibras orientadas em 90°.



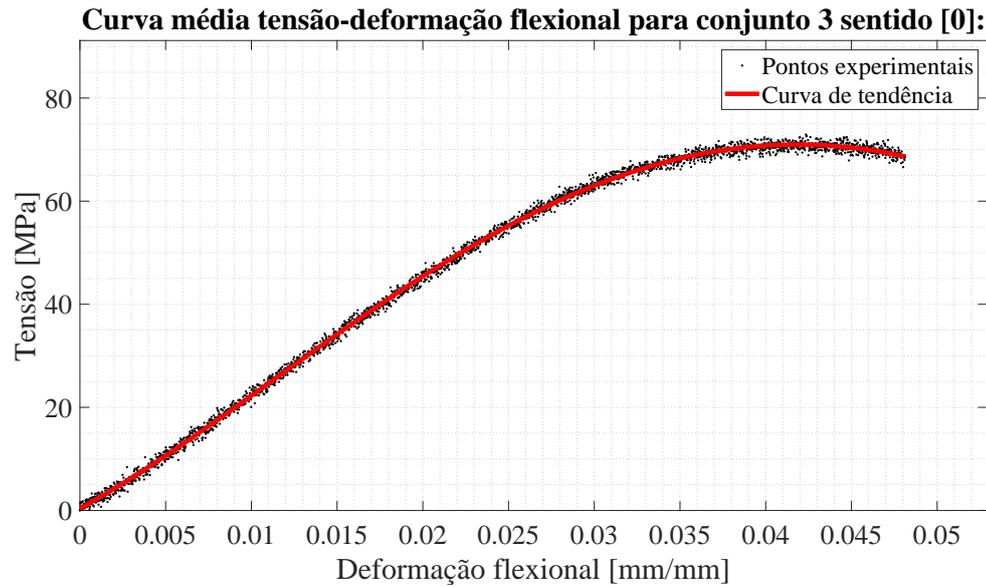
(c) Curva carga-deformação em flexão para conjunto de parâmetros 3 com fibras orientadas em 0°.



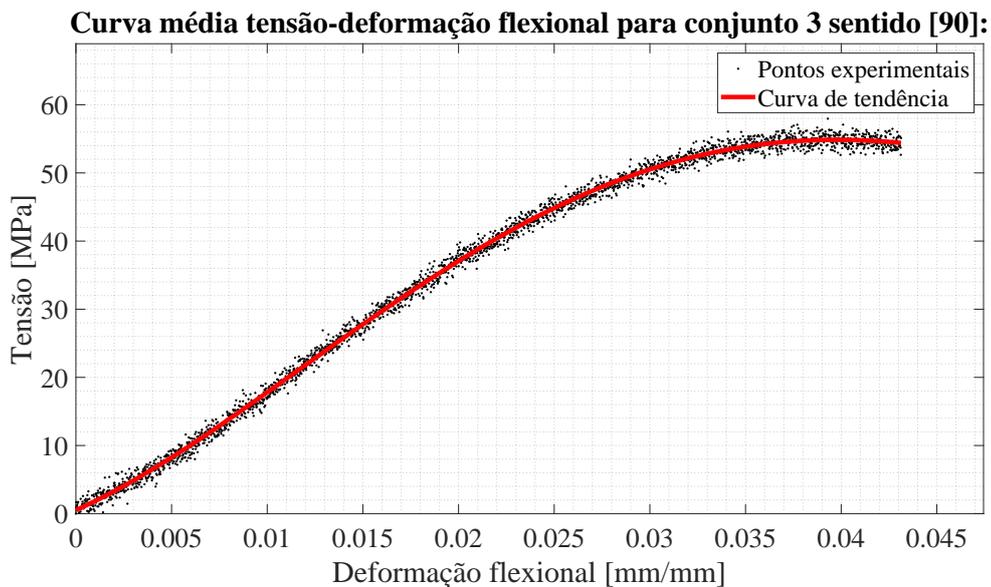
(d) Curva carga-deformação em flexão para conjunto de parâmetros 3 com fibras orientadas em 90°.

Figura 7.18 – Curvas carga-deformação em flexão para diferentes conjuntos de parâmetros de impressão e diferentes orientações das fibras.

O modelo em flexão foi realizado para o conjunto 3, com a finalidade de testar a previsibilidade do modelo considerando material ortotrópico. Os resultados obtidos com os ensaios de flexão de referência são mostrados na Fig. 7.19, sendo Fig. 7.16(a) para conjunto 1 com direção de  $[\pm 45]$  e conjunto 3 com direções de  $[\pm 45]$ ,  $[0]$  e  $[90]$ , estes são mostrados respectivamente na Fig. 7.16(b), Fig. 7.19(a) e Fig. 7.19(b).



(a) Curva tensão-deformação em flexão para conjunto de parâmetros 3 com fibras orientadas em  $0^\circ$ .



(b) Curva tensão-deformação em flexão para conjunto de parâmetros 3 com fibras orientadas em  $90^\circ$ .

Figura 7.19 – Curvas tensão-deformação em flexão para diferentes conjuntos de parâmetros de impressão e diferentes orientações das fibras.

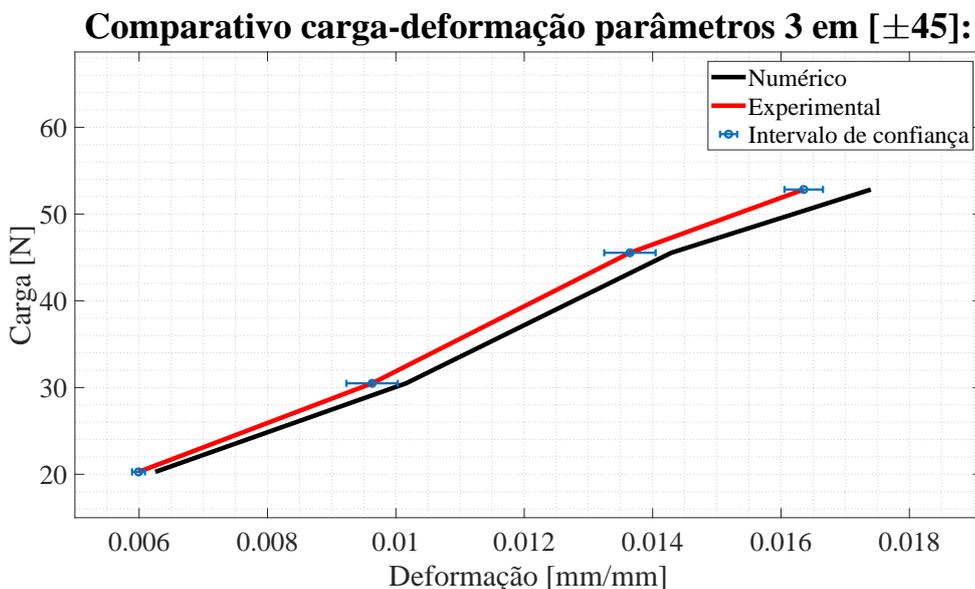
A obtenção das curvas de tendência mostradas na Fig. 7.19 são realizadas através de uma regressão polinomial, através da ferramenta *Curve Fitting* do MATLAB. Os valores obtidos através da regressão tem a capacidade de descrever 99,80% dos dados experimentais (*R-square* de 0,9980).

As propriedades obtidas para ensaio de flexão para o conjunto 3 dos parâmetros de impressão são mostradas na Tabela 7.7.

Tabela 7.10 – Propriedades obtidas para ensaio de flexão do conjunto 3 com diferentes direções de impressão.

Propriedade	Média	Desvio Padrão	Erro Padrão	Intervalo de confiança
Direção de impressão [ $\pm 45$ ] conjunto 3				
$E_b$ (GPa)	1,903	0,172	0,099	0,194
$\sigma_{fmax}$ (MPa)	62,376	1,593	0,919	1,802
$P_{max}$ (N)	105,623	2,698	0,980	1,928
$D_{max}$ (mm)	6,211	0,001	0,000	0,000
$\epsilon_{fmax}$ (mm/mm)	0,045	0,000	0,000	0,000
Direção de impressão [0] conjunto 3				
$E_{b1}$ (GPa)	2,211	0,298	0,172	0,337
$\sigma_{fmax}$ (MPa)	72,906	3,706	2,139	4,194
$P_{max}$ (N)	123,455	6,276	3,623	7,102
$D_{max}$ (mm)	5,781	0,002	0,001	0,002
$\epsilon_{fmax}$ (mm/mm)	0,042	0,000	0,000	0,000
Direção de impressão [90] conjunto 3				
$E_{b2}$ (GPa)	1,767	0,263	0,152	0,297
$\sigma_{fmax}$ (MPa)	57,963	2,001	1,155	2,265
$P_{max}$ (N)	98,151	3,389	1,956	3,835
$D_{max}$ (mm)	5,365	0,003	0,002	0,003
$\epsilon_{fmax}$ (mm/mm)	0,039	0,000	0,000	0,000

Neste modelo os valores de tensão e deformação também são medidos no ponto mais externo da face inferior (face tracionada). O comparativo é exibido na Fig. 7.20, Fig. 7.20(a) mostra o comparativo obtido para direção de [ $\pm 45$ ], Fig. 7.20(b) mostra o resultado comparativo obtido para direção de [0] e Fig. 7.20(c) exibi o resultado para direção de [90].

(a) Curva carga-deformação flexional comparativo com fibras orientadas em  $\pm 45^\circ$ .

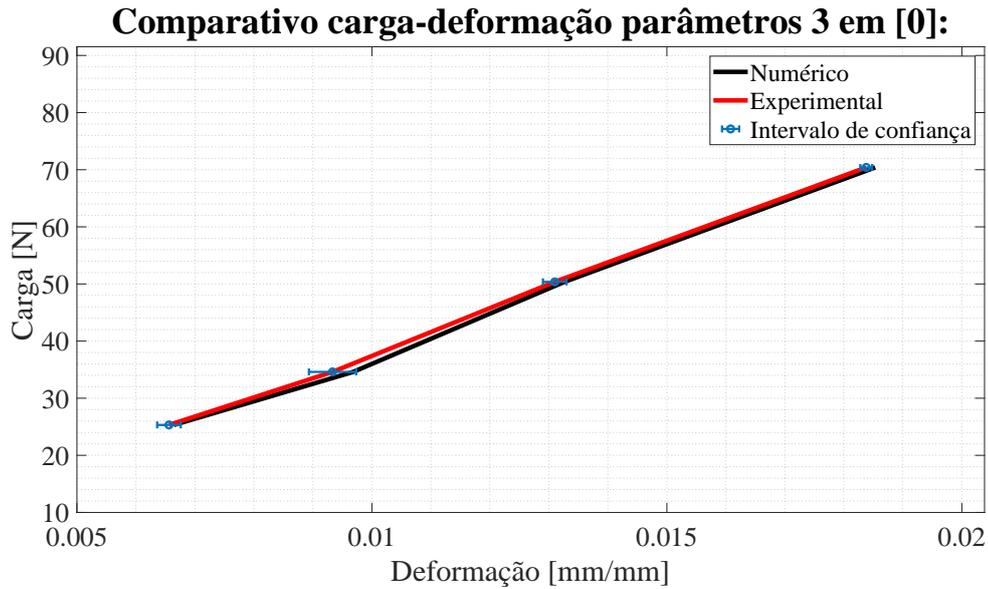
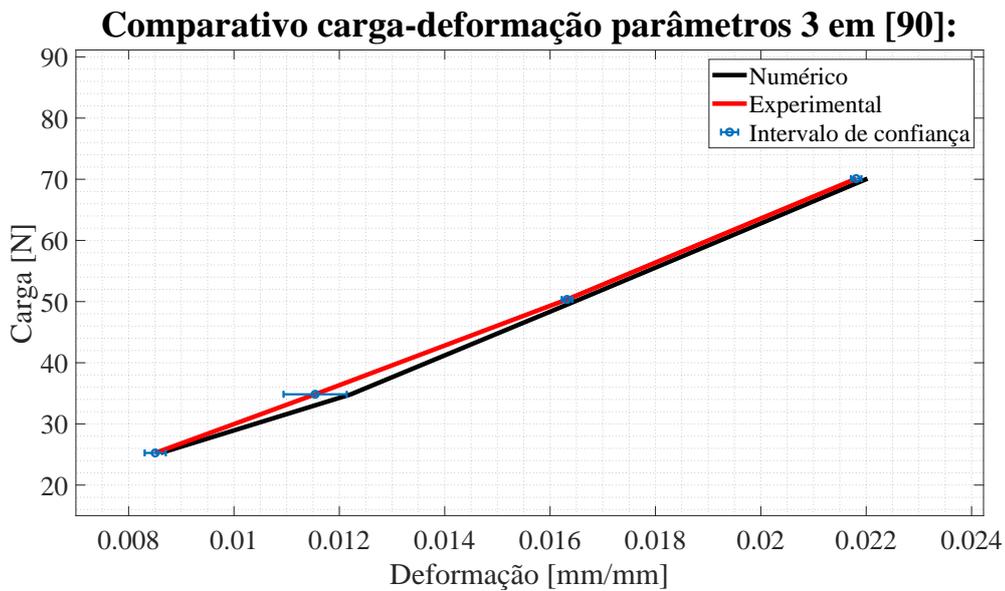
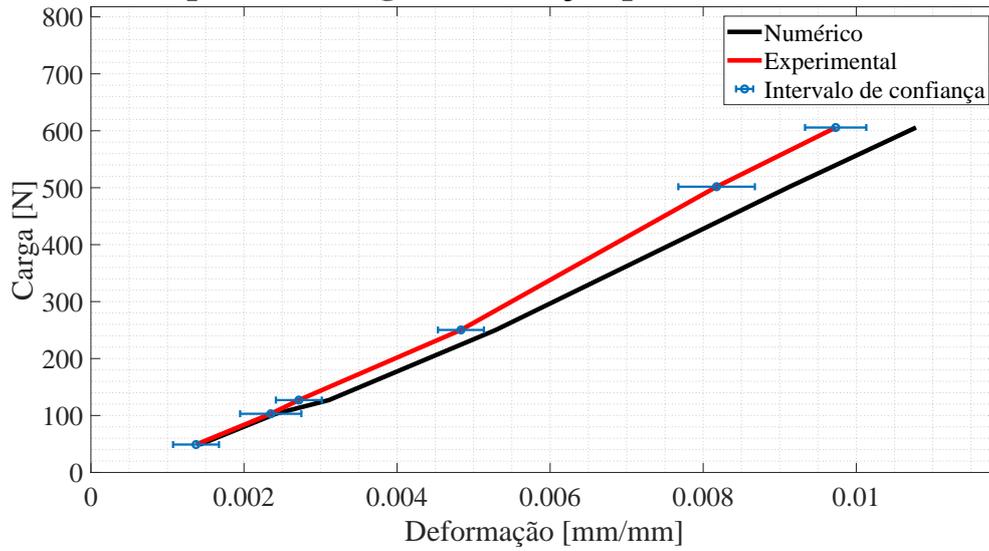
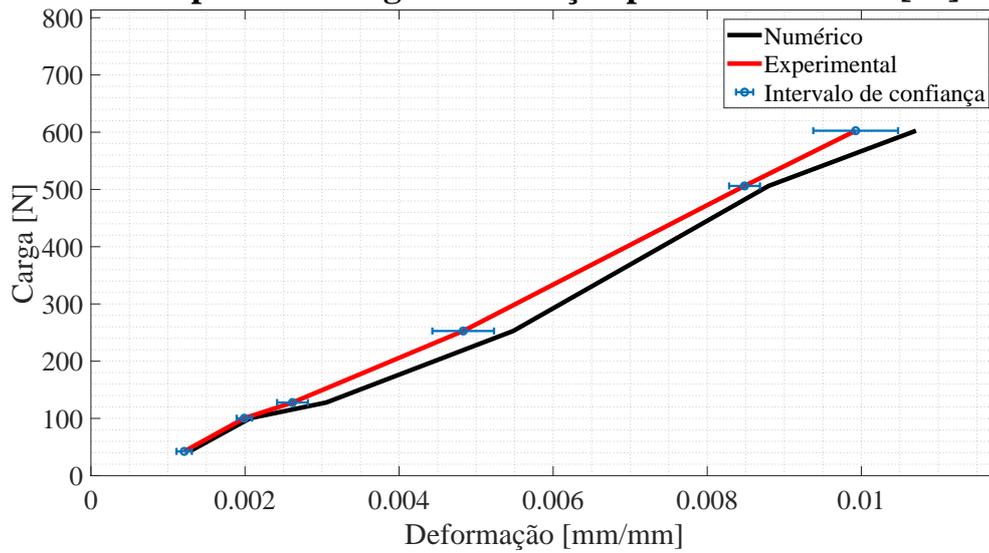
(b) Curva carga-deformação flexional comparativo com fibras orientadas em  $0^\circ$ .(c) Curva carga-deformação flexional comparativo com fibras orientadas em  $90^\circ$ .

Figura 7.20 – Curvas carga-deformação flexional comparativo entre numérico em modelo ortotrópico e experimental para diferentes ângulos de impressão .

O modelo 2 foi utilizado para verificar a capacidade de predição do modelo ortotrópico em diferentes ângulos de impressão, os resultados para esta comparação são exibidos na Fig. 7.21, sendo Fig. 7.21(a) para ângulo de  $30^\circ$ , Fig. 7.21(b) para ângulo de  $45^\circ$  e Fig. 7.21(c) para ângulo de  $60^\circ$ .

**Comparativo carga-deformação parâmetros w em [30]:**

(a) Curva carga-deformação comparativo para ângulo de 30°.

**Comparativo carga-deformação parâmetros 2 em [45]:**

(b) Curva carga-deformação comparativo para ângulo de 45°.

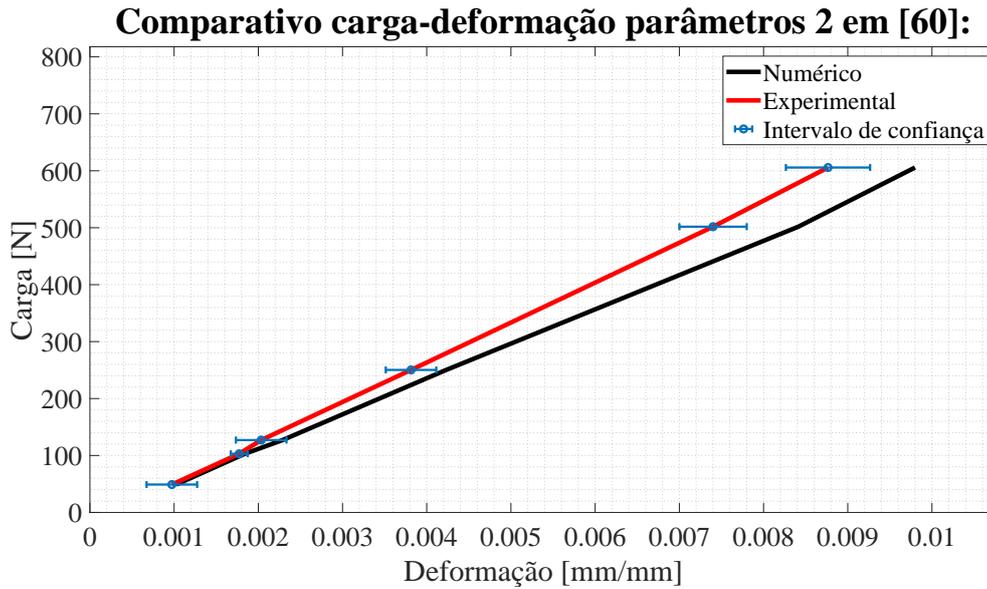


Figura 7.21 – Curvas carga-deformação comparativo entre numérico em diferentes ângulos e experimental para diferentes ângulos de impressão.

Desta forma pode-se analisar as diferenças entre cada modelo e avaliar a previsibilidade da consideração de material ortotrópico, estes comparativos são exibidos na Tabela 7.11 através da diferença percentual média.

Tabela 7.11 – Resultados percentuais para modelos ortotrópico em tração, flexão e diferentes ângulos.

Conjunto	Direção	Diferença média
Ensaio de tração vs modelo ortotrópico para tração		
Parâmetros 2	[0]	7,01%
Parâmetros 2	[90]	10,06%
Parâmetros 3	[0]	6,86%
Parâmetros 3	[90]	9,73%
Ensaio de tração em diferentes ângulos vs modelo ortotrópico		
Parâmetros 2	[30]	9,75%
Parâmetros 2	[45]	6,86%
Parâmetros 2	[60]	10,89%
Ensaio de flexão vs modelo ortotrópico para flexão		
Parâmetros 3	[0]	1,35%
Parâmetros 3	[±45]	5,30%
Parâmetros 3	[90]	1,82%

Desta forma o modelo ortotrópico apresentado oferece uma melhoria em previsibilidade

e precisão para carregamento em flexão, e boa previsibilidade para carregamento em tração, entretanto há uma redução da precisão para este tipo de carregamento.

Desta forma para as simulações e otimizações (Seção 7.4.3 e Seção ??) envolvendo carregamento de flexão é preferível a utilização do modelo ortotrópico, mesmo este possuindo simplificações.

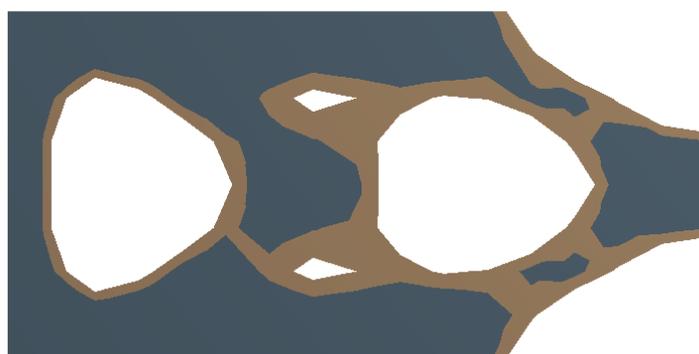
## 7.4 OTIMIZAÇÕES TOPOLÓGICAS

As otimizações topológicas são utilizadas como forma avançada de aplicação do processo de impressão 3D, os modelos otimizados servem como indicativo da validade dos modelos isotrópico e ortotrópico, mesmo em condições de geometria complexa e com fluxo de tensões em distribuições mais irregulares que corpos de prova padrão.

### 7.4.1 Efeitos de convergência de malha para otimização topológica

A análise dos efeitos de convergência de malha foi adotada para dois casos, sendo malha retangular estruturada e malha triangular. Esta convergência foi realizada com as condições geométricas e de contorno aplicadas ao caso de estudo 1, entretanto nesta seção não é utilizado dos resultados como referência para o modelo.

Os resultados das otimizações para diferentes quantidades de elementos retangulares são mostrados na Fig. 7.22, vale ressaltar quanto mais refinada a malha, mais caminhos de otimização o ANSYS enxerga para refino da otimização e mais próximo o valor da convergência na massa final, entretanto por ser um processo iterativo quanto mais refinado a malha mais tempo por iteração e por consequência mais tempo de otimização.



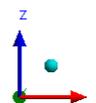
ANSYS  
R19.0  
Academic

(a) Malha retangular com 128 elementos.

ANSYS  
R19.0  
Academic



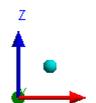
(b) Malha retangular com 512 elementos.



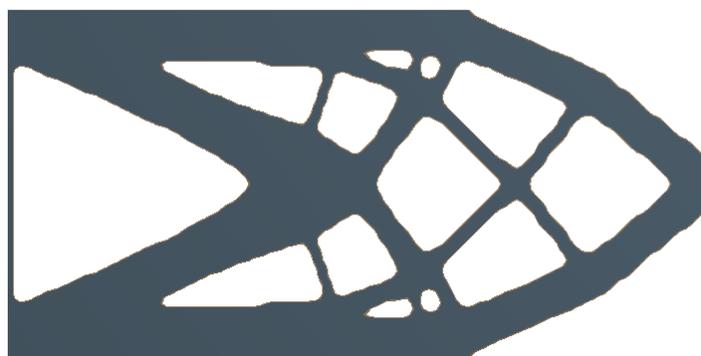
ANSYS  
R19.0  
Academic



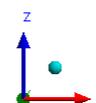
(c) Malha retangular com 2048 elementos.

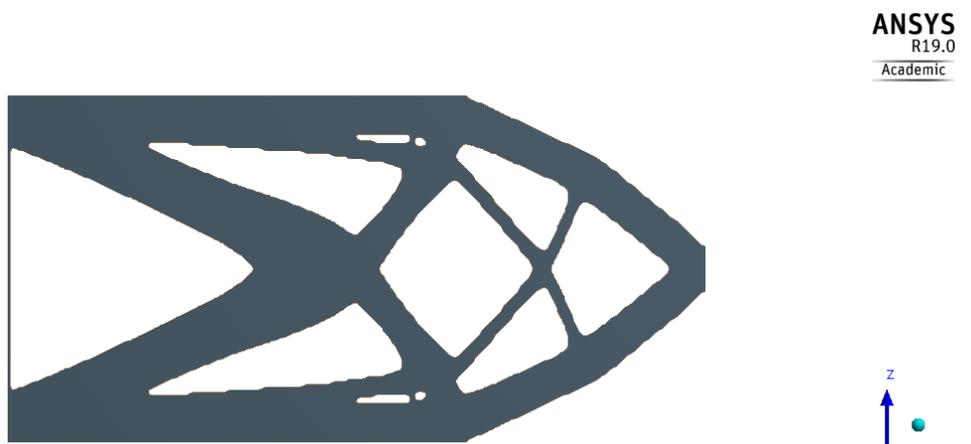


ANSYS  
R19.0  
Academic

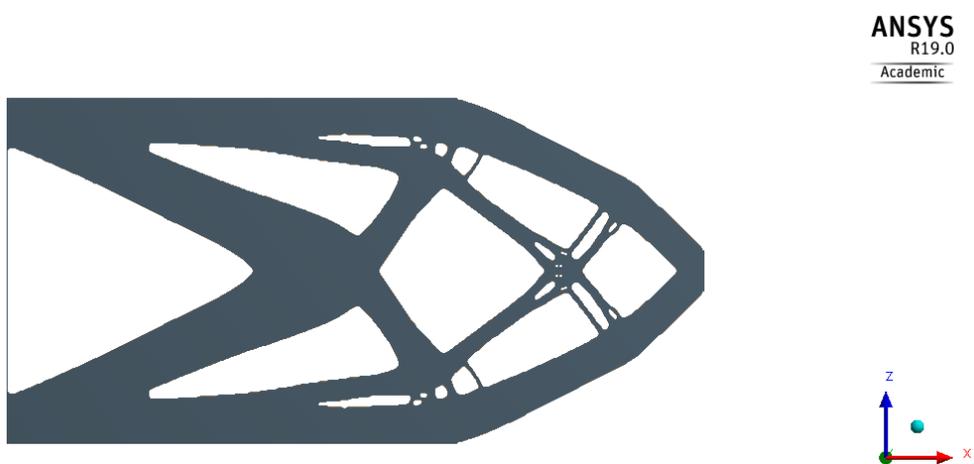


(d) Malha retangular com 8192 elementos.





(e) Malha retangular com 32768 elementos.



(f) Malha retangular com 131072 elementos.

Figura 7.22 – Resultados da geometria otimizada para diferentes refinamentos de malha com elementos retangulares.

A quantidade de iterações para cada processo se manteve aproximadamente constante para cada refino, isto é indicativo que a quantidade de iterações sofre pouca influência do número de elementos. O número de iterações necessária para convergência em cada otimização é mostrado na Tabela 7.12.

Tabela 7.12 – Quantidade de iterações necessárias para convergência para cada refino em malha retangular.

Quant. de iterações	Tamanho de elemento (mm)	Quant. de elementos
26	0,1250	128
25	0,0625	512
31	0,0312	2048
29	0,0156	8192
30	0,0078	32768
35	0,0039	131072

É possível notar que a partir da diferença de elementos há uma diferença de geometria, causando uma diferença de massa, na Fig. 7.23 exibi a convergência da malha baseada na quantidade de massa restante na peça otimizada.

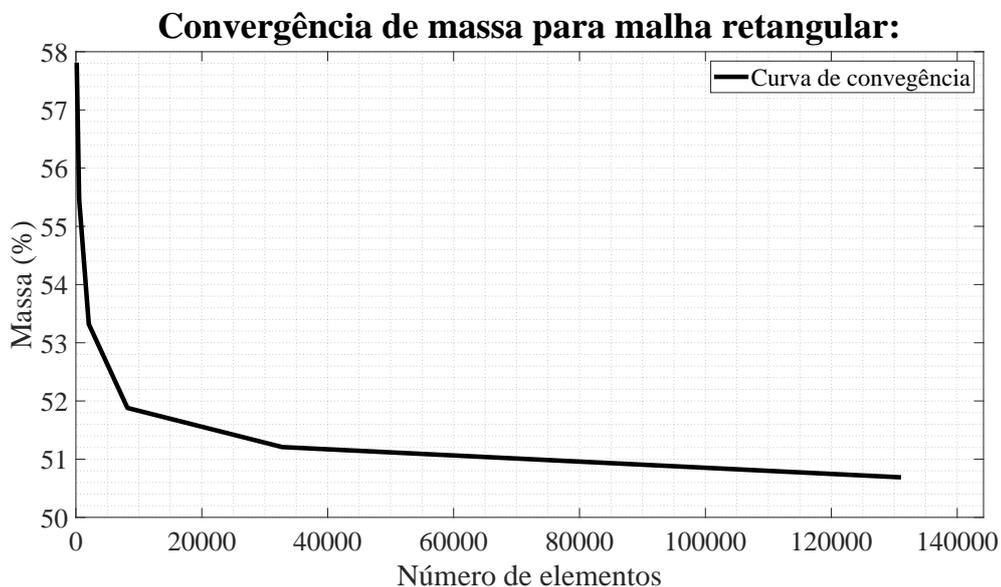


Figura 7.23 – Convergência da porcentagem de massa resultante da otimização para malha retangular.

As malhas com elementos triangulares tem seus resultados das otimizações mostrados na Fig. 7.24.



(a) Malha triangular com 256 elementos.



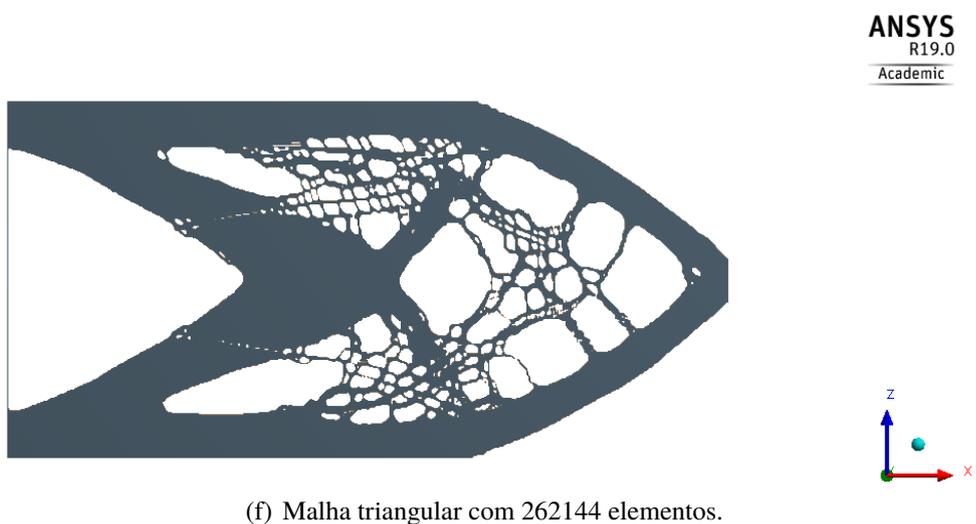
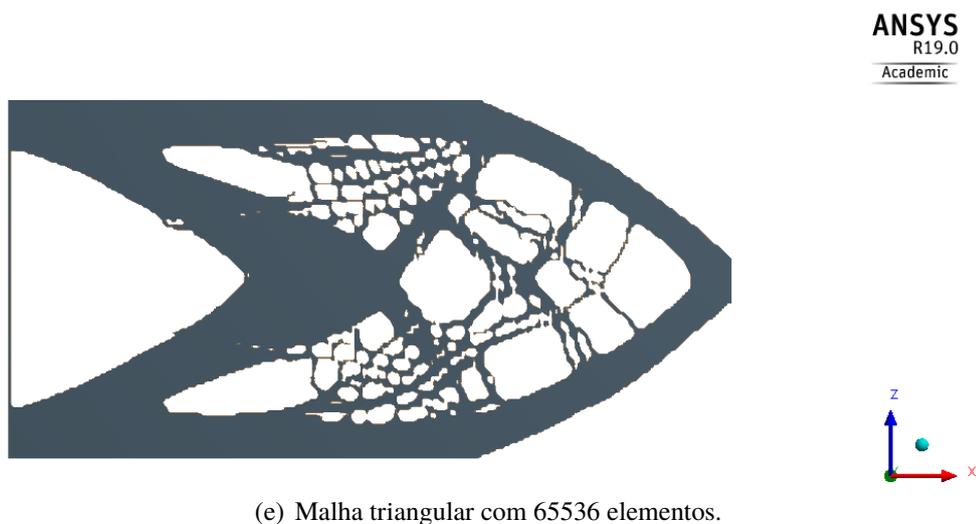


Figura 7.24 – Resultados da geometria otimizada para diferentes refinamentos de malha com elementos triangulares.

Nas malhas com elementos triangulares a quantidade de iterações para cada processo também se manteve aproximadamente constante para cada refino. O número de iterações necessária para convergência em cada otimização é mostrado na Tabela 7.13.

Tabela 7.13 – Quantidade de iterações necessárias para convergência para cada refino em malha triangular.

Quant. de iterações	Tamanho de elemento (mm)	Quant. de elementos
26	0,1250	256
25	0,0625	1024
31	0,0312	4096
29	0,0156	16384
30	0,0078	65536
35	0,0039	262144

Figura 7.25 mostra a convergência da malha triangular para porcentagem de massa restante na peça otimizada.

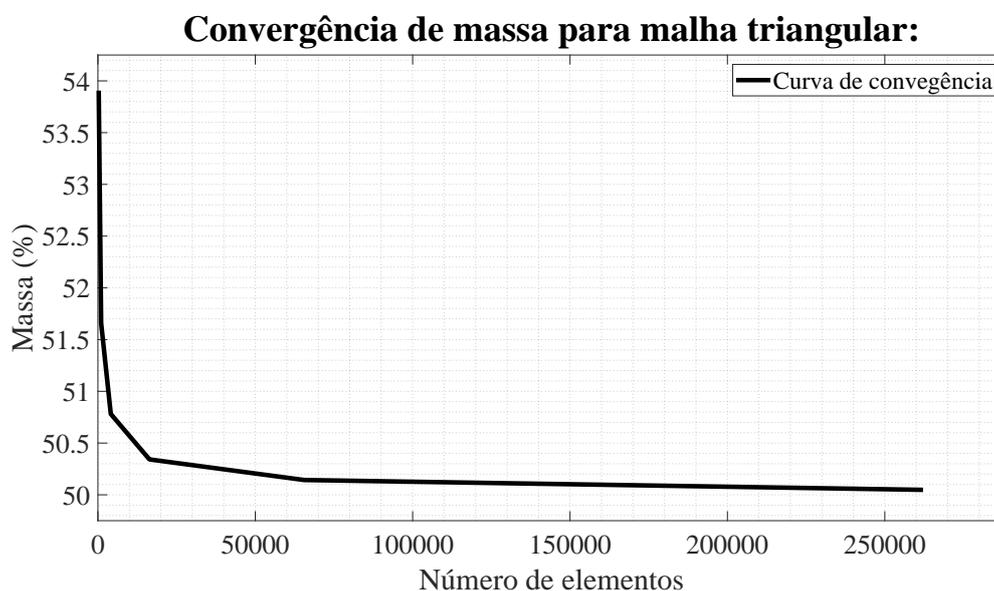


Figura 7.25 – Convergência da porcentagem de massa resultante da otimização para malha triangular.

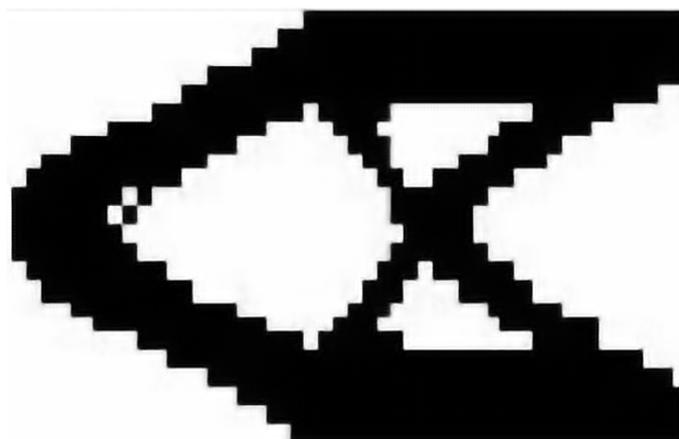
A malha triangular apresenta um melhor comportamento numérico, entretanto a geometria resultante da otimização é complexa e muitas vezes inviável de prototipação, desta forma é recomendável a utilização de malhas com elementos quadrangulares.

#### 7.4.2 Testes metodológicos da otimização topológica

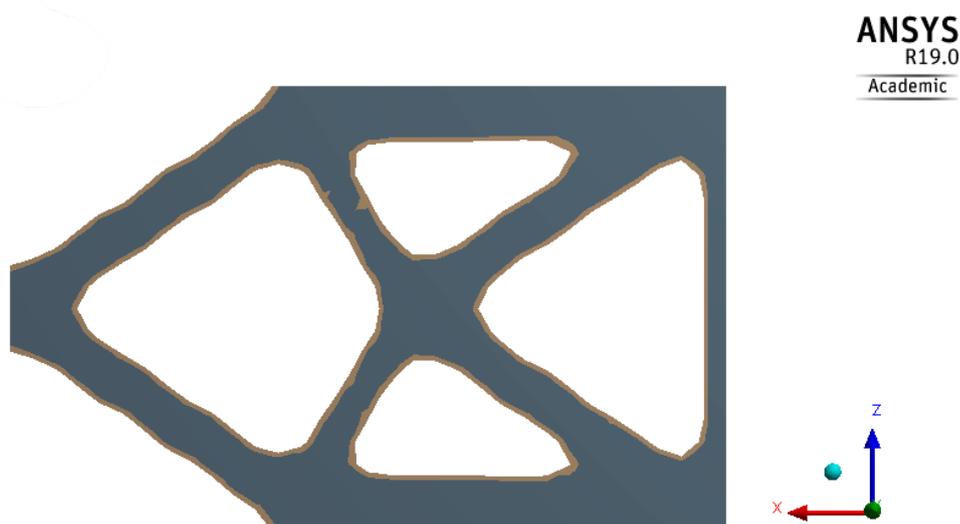
Os resultados comparativos para confirmação da metodologia de otimização são detalhados de forma a destacar as semelhanças entre o caso de estudo e o modelo utilizado pelo autor deste estudo. Vale ressaltar que as forças, aplicadas módulo de elasticidade, e densidade, são definidas como unitária em todos os casos de estudo, o que de acordo com [Jankovics et al. \(2018\)](#) não altera os resultados geométricos da otimização.

Figura 6.6 mostra as condições de contorno impostas para caso de estudo 1. Vale ressaltar que a geometria utilizada para análise da convergência é a mesma utilizada para análise de metodologia.

Na Fig. 7.26 é mostrado o resultado obtido para o caso de estudo 1. Sendo Fig. 7.26(a) o resultado obtido por [Gunwant e Misra \(2012\)](#), caso semelhante também é obtido por [Jankovics et al. \(2018\)](#). Figura 7.26(b) mostra o resultado obtido via metodologia explicitada base na Seção 6.2.3.



(a) Resultado referencial do caso de estudo 1 (GUNWANT; MISRA, 2012).

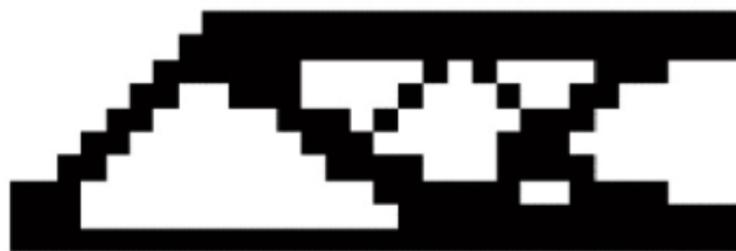


(b) Resultado obtido.

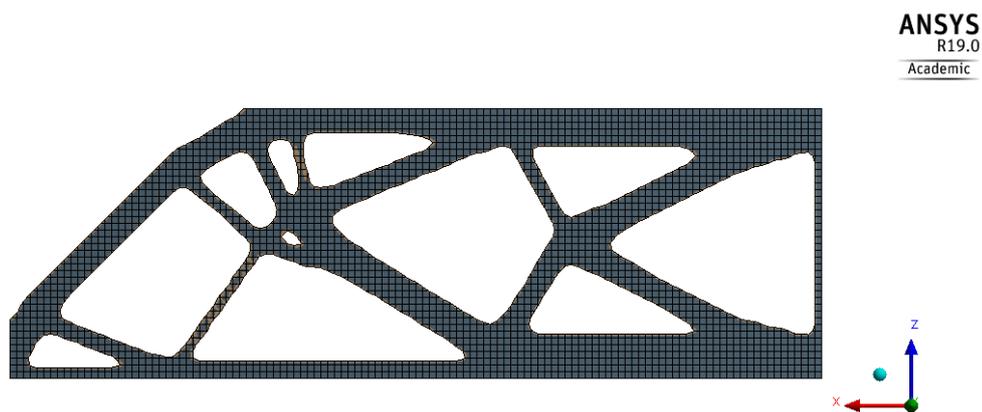
Figura 7.26 – Resultado obtido para caso de estudo 1 das otimizações topológicas.

Nota-se que o posicionamento dos locais de retirada de material são semelhantes, as demais diferenças são atribuídas a detalhes relacionados a convergência de malha para otimização topológica, no qual foi debatida na Seção 7.4.1. Logo é possível inferir que há uma boa aproximação do resultado final utilizando diferentes metodologias.

Na Fig. 7.27 é mostrado o resultado obtido para o caso de estudo 2. Sendo Fig. 7.27(a) o resultado obtido por Meng et al. (2019) e Fig. 7.27(b) mostra o resultado obtido pelo autor deste estudo.



(a) Resultado referencial do caso de estudo 2 (MENG et al., 2019).



(b) Resultado obtido.

Figura 7.27 – Resultado obtido para caso de estudo 2 das otimizações topológicas.

Novamente os resultados obtidos são semelhantes ao caso de estudo de referência, ambas as geometrias possuem os locais de vazios definidos de forma semelhante, sendo diferentes devido ao refino de malha e valor de massa objetivo.

Figura 7.29 mostra o resultado obtido para o último caso de estudo analisado, caso de estudo 3. Sendo Fig. 7.28(a) o resultado obtido por Liu et al. (2018) e Fig. 7.28(b) mostra o resultado obtido.



(a) Resultado referencial do caso de estudo 3 (LIU et al., 2018).

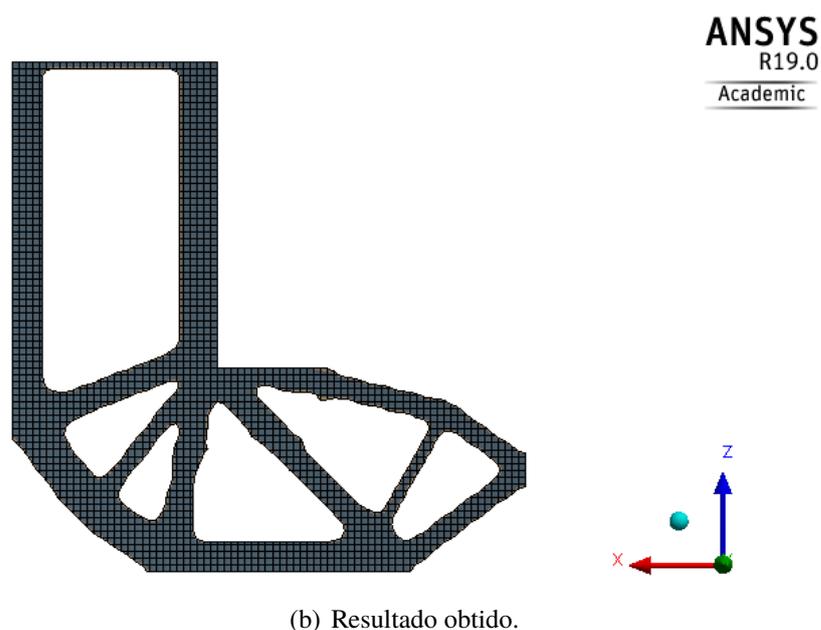
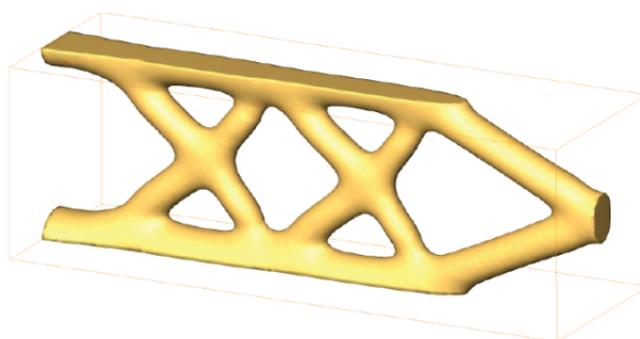


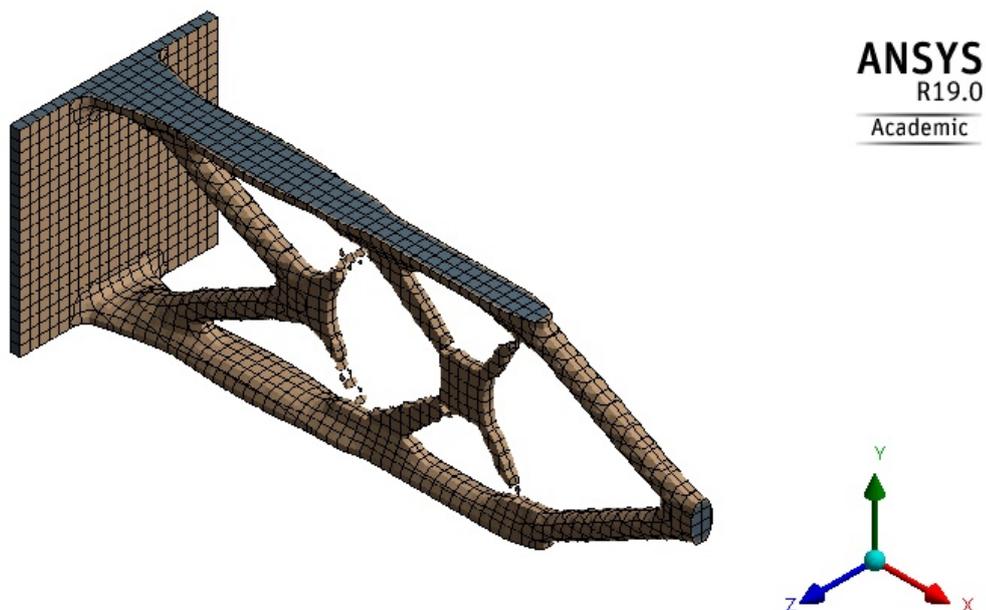
Figura 7.28 – Resultado obtido para caso de estudo 3 das otimizações topológicas.

Com o terceiro e ultimo caso de estudo é observado as zonas de otimização coincidentes entre o modelo do caso de estudo e a geometria obtida através da metodologia expressa na Seção 6.2.3.

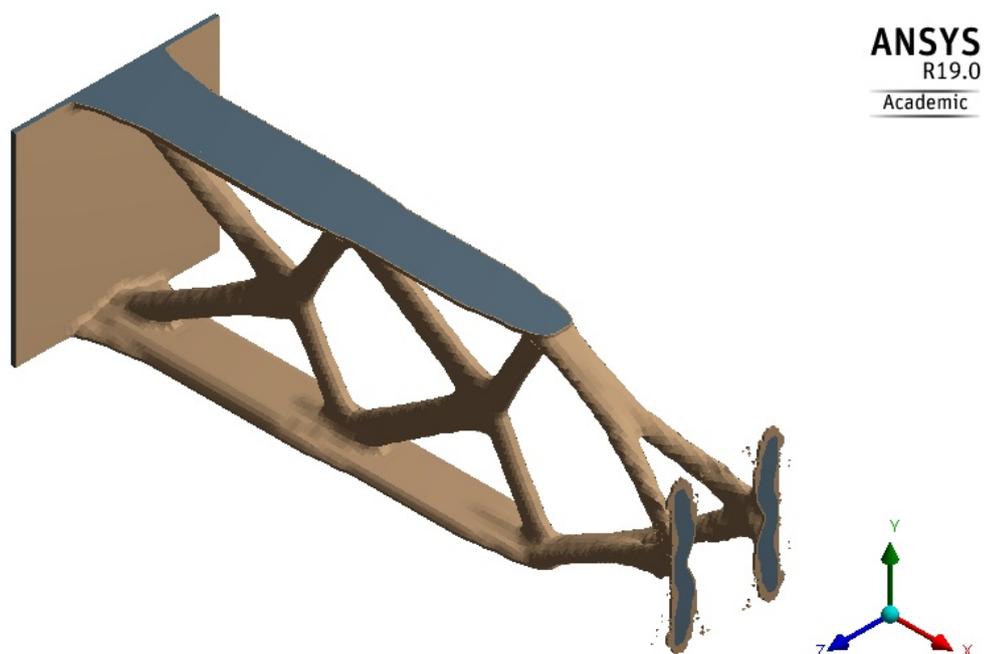
Figura 7.29 mostra o resultado obtido para o último caso de estudo analisado, caso de estudo 3. Sendo Fig. 7.28(a) o resultado obtido por Park e Sutradhar (2014) e Fig. 7.28(b) mostra o resultado obtido.



(a) Resultado referencial do caso de estudo 4 (PARK; SU-TRADHAR, 2014).



(b) Resultado obtido para tipo de contorno 1.



(c) Resultado obtido para tipo de contorno 2.

Figura 7.29 – Resultado obtido para caso de estudo 4 das otimizações topológicas.

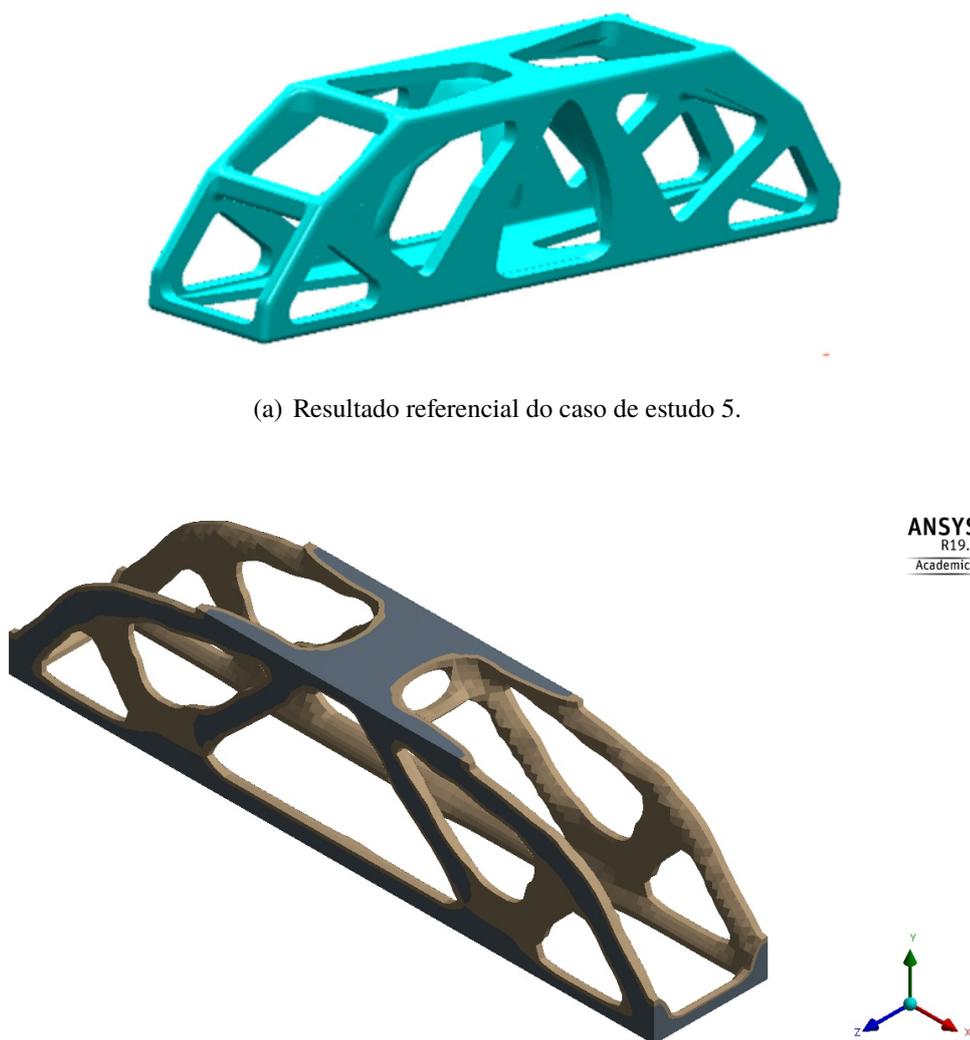
A geometria apresentada tanto na Fig. 7.29(b) quanto Fig. 7.29(c) demonstram uma boa proximidade com o caso apresentado por [Park e Sutradhar \(2014\)](#). Vale ressaltar que a diferença encontrada é devido a condição de contorno ser mudado de carga pontual (Fig. 6.9) para carga distribuída na área.

Com os casos validados é possível avançar nas otimizações e iniciar o caso de estudo voltado para impressão.

### 7.4.3 Otimização topológica da ponte

O design da ponte é seguindo o caso de estudo 5, presente em [Yang et al. \(2018\)](#), este caso difere dos demais casos de estudos devido ao seu ensaio em flexão e comparação numérica em dois casos para condições de apoio.

O resultado obtido na otimização é mostrada na Fig. 7.30, sendo Fig. 7.30(a) a geometria de referência e Fig. 7.30(b) o resultado obtido. Vale destacar que [Yang et al. \(2018\)](#) altera a geometria e suas condições manualmente para garantir melhor rigidez ao ser impressa, logo as diferenças apresentadas lateralmente são provenientes destas alterações.



(a) Resultado referencial do caso de estudo 5.

(b) Resultado obtido.

Figura 7.30 – Resultado obtido para caso de estudo 5 das otimizações topológicas.

O resultado obtido da otimização com a ponte (caso de estudo 5) em conjunto com suas vistas é demonstrada na Fig. 7.31.

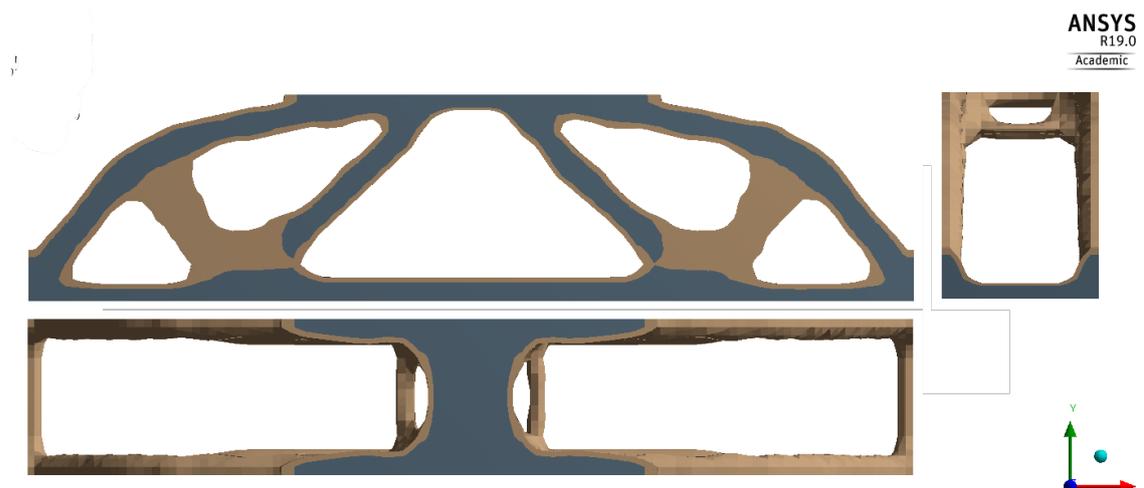


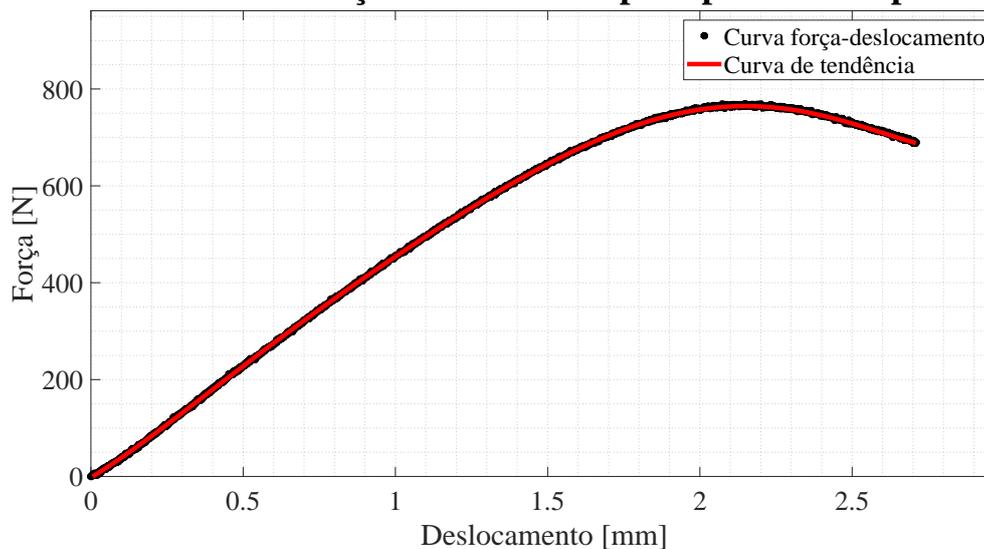
Figura 7.31 – Vistas para ponte.

O resultado presente na Fig. 7.31 foi impresso e testado, as médias dimensionais e suas estatísticas são mostradas na Tabela 7.14. Vale ressaltar que a partir dos dados obtidos na Seção 7.2, Tabela 7.2, é possível prever via CAD a massa resultante da ponte, sendo obtido o valor de 20,1360g, este valor é usado como referência para parâmetros de erro absoluto e erro relativo da massa na Tabela 7.14.

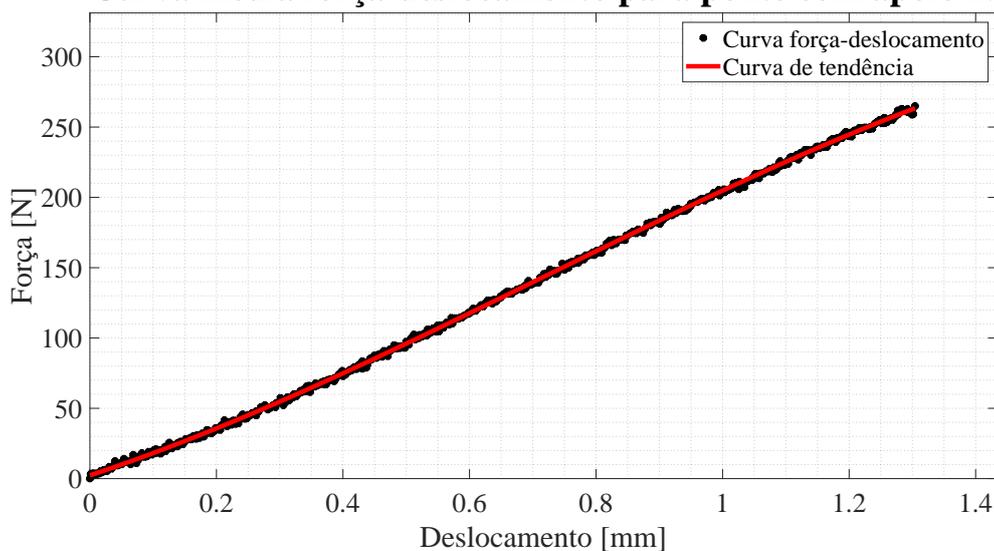
Tabela 7.14 – Características dimensionais médias para corpo de prova da ponte.

<b>Dimensão</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Erro Padrão</b>	<b>Intervalo de Confiança</b>	<b>Erro absoluto</b>	<b>Erro Relativo (%)</b>
Lar. (mm)	30,21	0,025	0,015	0,029	0,258	0,86
Com. (mm)	170,178	0,115	0,066	0,130	0,322	0,81
Alt. (mm)	40,039	0,033	0,019	0,038	0,211	0,53
Massa (g)	19,9827	3,38E-04	1,95E-04	3,83E-04	0,1771	0,88

O gráfico experimental de força por deslocamento é expresso na Fig. 7.32, sendo Fig. 7.32(a) para caso de apoio 1 e Fig. 7.32(b) para caso de apoio 2. Os resultados obtidos experimentalmente são utilizados para comparativo com obtido numericamente, tanto para modelo isotrópico quanto para modelo ortotrópico.

**Curva média força-deslocamento para ponte com apoio 1:**

(a) Força-deslocamento para caso de estudo 4 em condição de apoio 1.

**Curva média força-deslocamento para ponte com apoio 2:**

(b) Força-deslocamento para caso de estudo 4 em condição de apoio 2.

Figura 7.32 – Gráfico de Força-deslocamento para ponte com diferentes apoios.

A Fig. 7.32(a) apresenta desvio padrão médio de 18,349N na força e 0,002mm no deslocamento e Fig. 6.11(b) apresenta desvio padrão médio de 23,933N na força e 0,001mm no deslocamento.

As curvas de tendência propostas na Fig. 7.32 obtidas através de regressão tem a capacidade de descrever 99,99% dos dados experimentais (*R-square* de 0,9999).

Tabela 7.15 exibi as propriedades obtidas para o ensaio da ponte.

Tabela 7.15 – Propriedades obtidas para ensaio de flexão na ponte.

Propriedade	Média	Desvio Padrão	Erro Padrão	Intervalo de confiança
Condição de apoio 1				
$P_{max}$ (N)	769,136	24,508	14,149	27,733
$D_{max}$ (mm)	2,148	0,001	8,1E-04	0,001
Condição de apoio 2				
$P_{max}$ (N)	264,925	15,952	9,209	18,051
$D_{max}$ (mm)	1,304	0,002	0,001	0,002

O numérico da ponte é feito em acordo com o explicitado a geometria obtido da otimização (Fig. 7.31), sua discretização também é avaliada através da análise de convergência baseado no refino do tipo h, este resultado pode ser vista na Fig. 7.33.

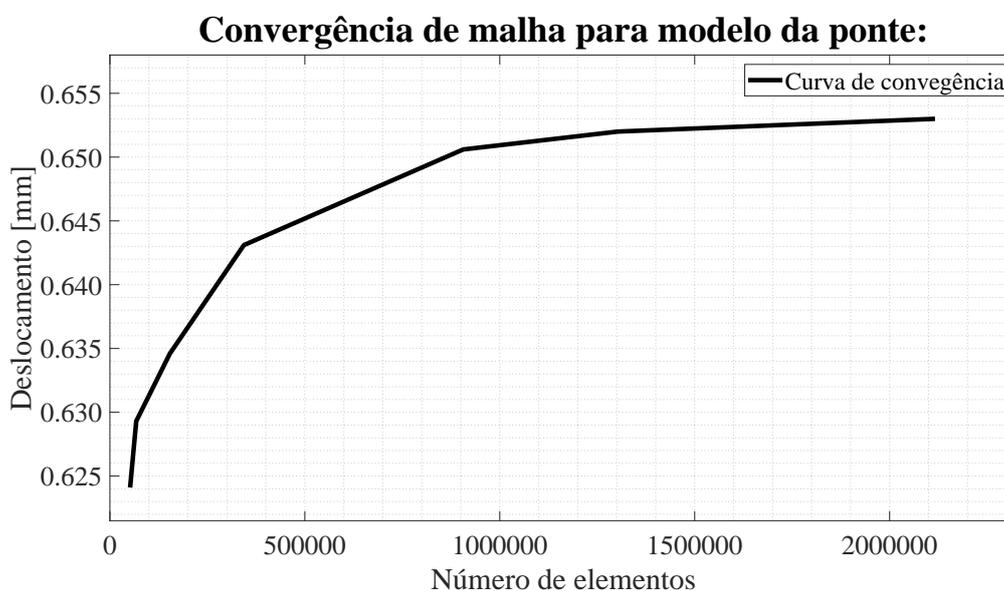
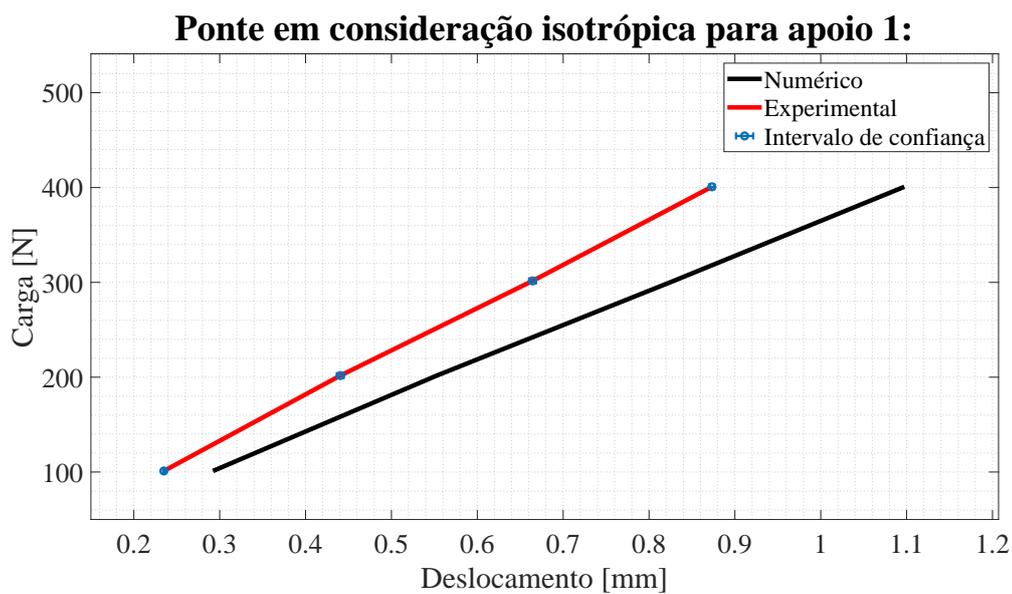
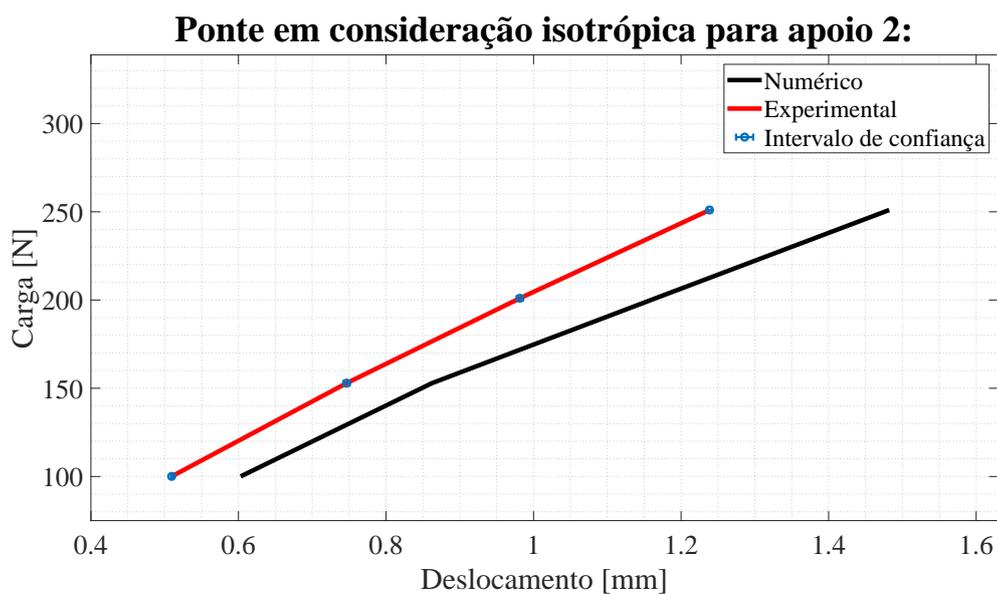


Figura 7.33 – Gráfico de convergência para modelo da ponte.

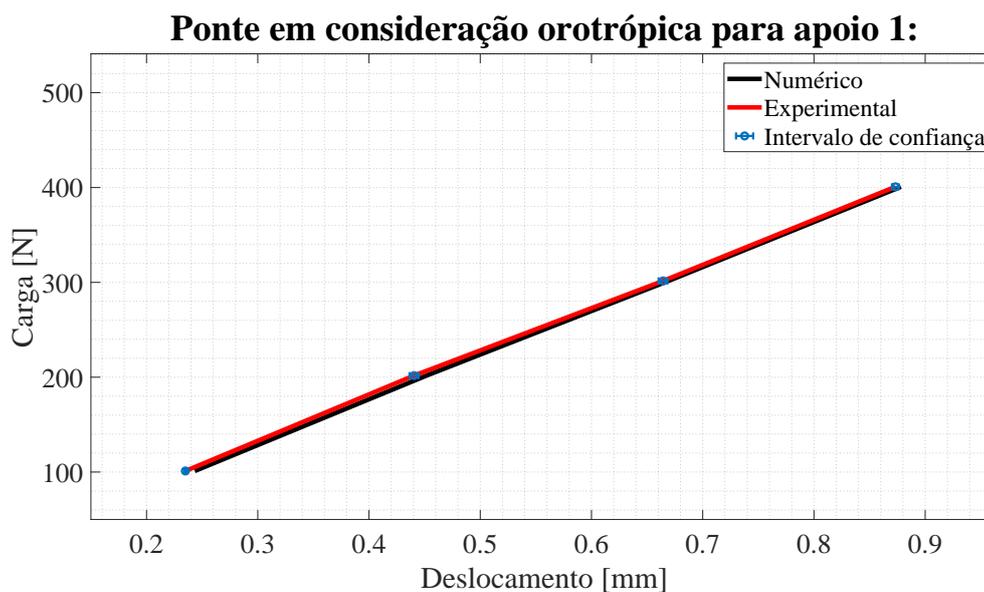
O comparativo numérico é mostrado na Fig. 7.34, sendo a Fig. 7.34(a) e Fig. 7.34(c) para caso do apoio 1 e Fig. 7.34(b) e Fig. 7.34(d) para caso do apoio 2. Com finalidade comparativa é expressado o caso com material com consideração isotrópica (Fig. 7.32(a) e Fig. 7.34(b)) e material com consideração ortotrópica (Fig. 7.34(c) e Fig. 7.34(d)).



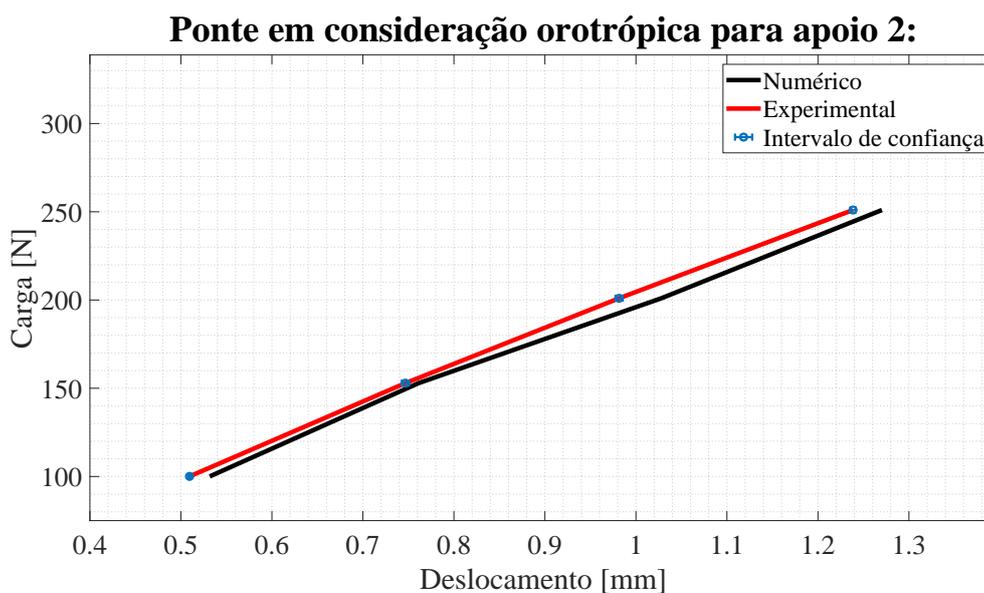
(a) Carga-deslocamento para caso de estudo 5 em condição de apoio 1, com consideração isotrópica.



(b) Força-deslocamento para caso de estudo 5 em condição de apoio 2, com consideração isotrópica.



(c) Carga-deslocamento para caso de estudo 5 em condição de apoio 1, com consideração ortotrópica.



(d) Carga-deslocamento para caso de estudo 5 em condição de apoio 2, com consideração ortotrópica.

Figura 7.34 – Gráfico de Carga-deslocamento para caso de estudo 4 com diferentes apoios e comparativo entre consideração isotrópica e ortotrópica.

Desta forma pode-se analisar as diferenças entre modelos e atestar a capacidade preditiva destes modelos. Tabela 7.16 mostra o comparativo entre modelos para cada configuração de apoio.

Tabela 7.16 – Comparativo entre numérico e experimental para caso de estudo 4 com diferentes considerações isotrópicas e ortotrópicas.

<b>Condição de apoio</b>	<b>Diferença média</b>
Modelo de material isotrópico	
Apoio 1	20,20%
Apoio 2	15,69%
Modelo de material ortotrópico	
Apoio 1	0,99%
Apoio 2	3,14%

É possível notar da Tabela 7.16 que o modelo considerando material ortotrópico obteve melhores resultados com menor porcentagem de erro em comparação com o modelo experimental. Este resultado é favorável ao resultado obtido na Seção 7.3, atestando a capacidade preditiva do modelo ortotrópico incluindo suas considerações.

## **Parte IV**

# **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

## 8 CONCLUSÕES

O modelo numérico para PLA com hipótese de material isotrópico e homogêneo se mostrou como uma aproximação satisfatória em relação aos dados experimentais. A utilização dessa hipótese demonstrou ser viável para projetos no qual envolvam peças impressas com carregamento na direção principal das fibras.

Os teste de validação de modelo ortotrópico se mostraram eficientes em predizer o comportamento mecânico para carga em flexão e em tração, entretanto, o modelo ortotrópico para tração possui um maior erro comparado ao modelo isotrópico para tração.

Os testes de previsibilidade são adequados para testar o modelo com suas hipóteses. Estes foram capazes de cobrir casos de forma preditiva, comprovado através da simulação em flexão e em seguida realização do ensaio experimental de flexão, os resultados numéricos e experimentais se mostraram próximos para esses casos.

As metodologias utilizadas para desenvolver as otimizações topológicas se mostraram adequadas, desde que sejam utilizada com a discretização adequada.

A otimização topológica conduzida se mostra eficiente em reduzir a massa e se manter dentro dos limites de previsibilidade da mecânica estrutural elástica.

## 9 RECOMENDAÇÕES

O presente estudo levanta problemáticas importantes, mas que foge do escopo inicial do estudo, logo futuros estudos são necessários a partir das temáticas elencadas das novas possibilidades cogitadas.

Para aumentar a qualidade de impressão pode ser variado mais parâmetros de impressão e em maiores intervalos, desta forma é possível obter relações mais precisas entre os parâmetros de impressão e os poros inerentes ao processo de fabricação.

Estudo futuros podem agregar no modelo ortotrópico proposto, de forma a reduzir as simplificações utilizadas para construção do modelo e ampliar sua verossimilhança e sua capacidade de predição.

Análises de campo de deformação com *Digital Image Correlation* (DIC) pode auxiliar na melhor modelagem numérica e detectar concentradores de tensão e diferenciar os sentidos de impressão de forma mais detalhada.

As otimizações topológicas abrem espaço para explorar métodos que incluem variação de porcentagem de preenchimento na impressão, em conjunto com diferentes filamentos em uma peça.

Por fim o presente estudo levanta a necessidade para futuras pesquisas e desenvolvimento tecnológicos, mas vale a ressalva de destaque a necessidade de desenvolvimento das padronizações para redução da variabilidade de produção, com produção de uma base sólida para o desenvolvimento dos modelos matemáticos e sua confiabilidade.

# Referências

- ABIPLAST. Perfil 2015. Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPlast), p. 26–28, 2016. Citado na página 31.
- AHN, S.-H. et al. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*, Emerald, v. 8, n. 4, p. 248–257, 2002. ISSN 1355-2546. DOI:10.1108/13552540210441166. Citado 4 vezes nas páginas 27, 34, 35 e 40.
- ALVES, M. F. S. et al. Design of the structure and reentry system for the laicansat-3 platform. In: *Proceedings of the 2nd IAA Latin American CubeSat Workshop*. Florianópolis, Brasil: American Institute of Aeronautics and Astronautics (IAA), 2016. Citado 4 vezes nas páginas 9, 40, 42 e 43.
- ANET. *A8-M 3D Printer Installation Guide*. [S.l.], 2018. Citado 4 vezes nas páginas 12, 59, 143 e 157.
- Anet 3D Printer. *Anet 3D printer A8M Double*. 2018. Acessado em: 15 de Maio de 2019. Disponível em: <[http://www.anet3d.com/prod\\_view.aspx?TypeId=12&Id=169&FId=t3:12:3](http://www.anet3d.com/prod_view.aspx?TypeId=12&Id=169&FId=t3:12:3)>. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 59.
- ANSYS. *SHELL181*. [S.l.], 2010. Citado na página 77.
- ANSYS. *SHELL186*. [S.l.], 2018. Citado na página 74.
- ASTM. ASTM D638-14, standard test method for tensile properties of plastics. American Society for Testing and Materials (ASTM) International, 2014. DOI:10.1520/D0638-14. Citado 4 vezes nas páginas 10, 13, 64 e 67.
- ASTM. ASTM D790-17, standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. American Society for Testing and Materials (ASTM) International, 2017. DOI:10.1520/D0790-17. Citado na página 65.
- BEER, F. P. et al. *Mecânica dos materiais*. 5ª. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2008. ISBN 0-07-352938-9. Citado na página 49.
- BENDSOE, M. P.; SIGMUND, O. *Topology Optimization Theory, Methods and Applications*. [S.l.]: Springer, 2003. ISBN 3-540-42992-i. Citado 3 vezes nas páginas 9, 50 e 52.
- BERMAN, B. 3-d printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, Elsevier, v. 55, n. 2, p. 155–162, 2012. ISSN 0007-6813. DOI:10.1016/j.bushor.2011.11.003. Citado 3 vezes nas páginas 14, 34 e 36.
- BORGES, R. A. et al. Laicansat-5: a mission for recording the total solar eclipse from the stratosphere. In: *2018 IEEE Aerospace Conference*. Big Sky, MT: Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE), 2018. ISBN 978-1-5386-2014-4. DOI:10.1109/AERO.2018.8396703. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 43.
- CALLISTER, W. D. *Materials Science and Engineering - An Introduction*. 7ª. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2006. 577-615 p. ISBN 0-00697-011-7. Citado 3 vezes nas páginas 32, 45 e 156.

- CANEVAROLO JR., S. V. *Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros*. 2ª. ed. [S.l.]: Artiliber, 2006. v. 2. 21-32 p. ISBN 978-858809810-7. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 34.
- CARVALHO, E. A. de; DUARTE, E. T. V. Ensaio de flexão: uma revisão dos modelos matemáticos empregados na sua análise. In: *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*. Darwin, Austrália: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECiMat), 2000. Citado na página 104.
- CHEN, W.-F.; SALEEB, A. F. *Constitutive Equations for Engineering Materials*. [S.l.]: Elsevier, 1994. v. 1. ISBN 0-444-88408-4. Citado 3 vezes nas páginas 14, 48 e 49.
- DANIEL, I. M.; ISHAI, O. *Engineering mechanics of composite materials*. 2ª. ed. [S.l.]: Oxford University Press, 2006. ISBN 978-019515097-1. Citado na página 45.
- DASSAULT SYSTEMES. *SOLIDWORKS Help - SIMP Method for Topology Optimization*. [S.l.], 2019. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 52.
- Dassault Systèmes. *Tessellating an Object*. Dassault Systèmes, 2001. Acessado em: 06 de Maio de 2019. Disponível em: <[http://catiadoc.free.fr/online/stlug\\_C2/stlugbt0303.htm](http://catiadoc.free.fr/online/stlug_C2/stlugbt0303.htm)>. Citado na página 60.
- DIZON, J. R. C. et al. Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive Manufacturing*, Elsevier, v. 20, p. 44–67, 2018. ISSN 2214-8604. DOI:10.1016/j.addma.2017.12.002. Citado 4 vezes nas páginas 9, 27, 35 e 47.
- FARRINGTON, D. W. et al. Poly(lactic acid) fibers. In: *Biodegradable and sustainable*. Florianópolis, Brasil: NatureWorks, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 40.
- FECHINE, G. J. M. *Polímeros biodegradáveis: tipos, mecanismos, normas e mercado mundial*. [S.l.]: Editora Mackenzie, 2013. ISBN 978-85-829-3024-3. Citado na página 39.
- FERREIRA, F. P.; SANTANA, R. M. C. Associação brasileira de polímeros. In: *Anais do 9º Congresso Brasileiro de Polímeros*. Campina Grande, Paraíba, Brasil: Associação Brasileira de Polímeros (ABPol), 2007. Citado na página 31.
- GUNWANT, D.; MISRA, A. Topology optimization of continuum structures using optimality criterion approach in ansys. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, IJAET, v. 5, n. 1, p. 470–485, 2012. ISSN 2231-1963. Citado 4 vezes nas páginas 10, 77, 121 e 122.
- HALPIN, J. C. Effects of environmental factors on composite materials. Air Force Materials Laboratory, n. AFML-TR-67-423, 1969. Citado na página 45.
- HUANG, Y. et al. Additive manufacturing: Current state, future potential, gaps and needs, and recommendations. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, The American Society of Mechanical Engineers (ASME), v. 137, n. 1, 2015. ISSN 1087-1357. DOI:10.1115/1.4028725. Citado 4 vezes nas páginas 14, 24, 33 e 34.
- HÄLLREN, S.; PEJRYD, L.; EKENGREN, J. 3D data export for additive manufacturing - improving geometric accuracy. *Procedia CIRP*, Elsevier, v. 50, p. 518–523, 2016. ISSN 2212-8271. DOI:10.1016/j.procir.2016.05.046. Citado 3 vezes nas páginas 9, 40 e 41.

- INSTRON. *Servo hydraulic Fatigue Testing System*. [S.l.], 2012. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 67.
- INSTRON. *Accessories for Materials Testing*. [S.l.]: Instron, 2018. Catálogo. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 68.
- JANKOVICS, D. et al. Developing topology optimization with additive manufacturing constrain in ANSYS. *International Federation of Automatic Control*, Elsevier, v. 51, n. 11, p. 1359–1364, 2018. ISSN 2405-8963. DOI:10.1016/j.ifacol.2018.08.340. Citado 4 vezes nas páginas 27, 52, 53 e 121.
- KEREKESA, T. W. et al. Characterization of process–deformation/damage property relationship of fused deposition modeling (fdm) 3d-printed specimens. *Additive Manufacturing*, Elsevier, v. 25, p. 532–544, 2019. ISSN 2214-8604. DOI:10.1016/j.addma.2018.11.008. Citado 2 vezes nas páginas 92 e 98.
- KILLEN, A. et al. Exploring the use of additive manufacturing in providing an alternative approach to the design, manufacture and maintenance of interior rail components. In: *Australasian Transport Research Forum 2018 Proceedings*. Darwin, Austrália: Australasian Transport Research Forum (ATRF), 2018. Citado 4 vezes nas páginas 14, 33, 34 e 36.
- LEE, C.-Y.; LIU, C.-Y. The influence of forced-air cooling on a 3d printed part manufactured by fused filament fabrication. *Additive Manufacturing*, v. 25, p. 196–203, 2018. ISSN 2214-8604. DOI:10.1016/j.addma.2018.11.012. Citado na página 86.
- LINPSON, H. 3-d printing the history of mechanisms. *Journal of Mechanical Design*, The American Society of Mechanical Engineers (ASME), v. 127, n. 5, p. 1019–1033, 2005. ISSN 1050-0472. DOI:10.1115/1.1902999. Citado 3 vezes nas páginas 32, 37 e 46.
- LIU, S. et al. A realization method for transforming a topology optimization design into additive manufacturing structures. *Engineering*, Elsevier, v. 4, n. 2, p. 277–285, 2018. ISSN 2095-8099. DOI:10.1016/j.eng.2017.09.002. Citado 4 vezes nas páginas 10, 27, 78 e 123.
- LU, B.; LI, D.; TIAN, X. Development trends in additive manufacturing and 3D printing. *Engineering*, Elsevier, v. 1, n. 1, p. –89, 2015. ISSN 2095-8099. DOI:10.15302/J-ENG-2015012. Citado 8 vezes nas páginas 24, 31, 32, 37, 39, 41, 42 e 51.
- LUCA, V. Design and manufacture of optimized continuous composite fiber filament using additive manufacturing systems. *Journal of Material Sciences & Engineering*, OMICS International, v. 6, n. 4, 2017. ISSN 2169-0022. DOI:10.4172/2169-0022.1000363. Citado 5 vezes nas páginas 26, 31, 32, 105 e 106.
- MATSUZAKI, R. et al. Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation. *Nature Scientific Reports*, Nature, v. 6, 2016. ISSN 2169-0022. DOI:10.1038/srep23058. Citado 6 vezes nas páginas 25, 34, 41, 42, 105 e 106.
- MEGSON, T. H. G. *An Introduction to Aircraft Structural Analysis*. 4ª. ed. [S.l.]: Elsevier, 2010. 331- p. ISBN 9-38050-162-5. Citado na página 46.
- MENG, L. et al. From topology optimization design to additive manufacturing: Today’s success and tomorrow’s roadmap. *Archives of Computational Methods in Engineering*, Springer, v. 26, n. 2, 2019. ISSN 1886-1784. DOI:10.1007/s11831-019-09331-1. Citado 13 vezes nas páginas 9, 24, 25, 27, 50, 51, 52, 54, 55, 56, 77, 122 e 123.

- NGO, T. D. et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, v. 143, p. 172–196, 2018. ISSN 1359-8368. DOI:10.1016/j.compositesb.2018.02.012. Citado 10 vezes nas páginas 9, 14, 24, 32, 33, 34, 36, 39, 42 e 47.
- NOVOTNY, A. A.; FANCELLO, E. A. Um refinamento h, p e hp adaptativo na análise de flexão de placas semi-espessas. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, v. 14, n. 1, p. 25–48, 1998. ISSN 0213-1315. Citado na página 54.
- OLIVEIRA, G. A. B. *Predição de propriedades mecânicas de compósitos unidirecionais através de redes neurais artificiais*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), 2018. Citado 7 vezes nas páginas 9, 12, 45, 46, 47, 48 e 156.
- OLYMPUS. *3D Measuring Laser Microscope OLS4100 LEXT*. [S.l.], 2013. Citado 3 vezes nas páginas 10, 14 e 70.
- OTANI, L. B.; PEREIRA, A. H. A. Elastic moduli characterization of composites using the impulse excitation technique. *Technical-scientific Informative ITC-06 / ATCP*, ATCP Physical Engineering, v. 6, 2014. Rev. 1.3. Citado na página 104.
- PARK, J.; SUTRADHAR, A. A multi-resolution method for 3D multi-material topology optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Elsevier, v. 285, n. 5, p. 571–586, 2014. ISSN 0045-7825. DOI:10.1016/j.cma.2014.10.011. Citado 6 vezes nas páginas 10, 27, 28, 78, 124 e 125.
- PATANWALA, H. S. et al. The microstructure and mechanical properties of 3D printed carbon nanotube-polylactic acid composites. *Polymer Composites*, Wiley, v. 40, n. 6, p. 1060–1071, 2017. ISSN 1548-0569. DOI:10.1002/pc.24494. Citado na página 88.
- PRADELLA, J. G. da C. Biopolímeros e intermediários químicos. Centro de Tecnologia de Processos e Produtos, n. 84 396-205, p. 5–6, 2006. Citado na página 31.
- REICHENTHAL, A. *Beam Me Up a Part, Scotty*. IndustryWeek, 2010. Entrevista concedida a Peter Alpern. Acessado em: 27 de Abril de 2019. Disponível em: <<https://www.industryweek.com/product-development/beam-me-part-scotty>>. Citado na página 24.
- RIBEIRO, G. P. *Caracterização Mecânica de Estruturas Manufaturadas por Adição de Material Termoplástico com diferentes níveis e formas de preenchimento*. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade de Brasília, 2019. Citado na página 96.
- ROBERSON, D. A.; ESPALIN, D.; WICKER, R. B. 3D printer selection: A decision-making evaluation and ranking model. *Virtual and Physical Prototyping*, Taylor & Francis, v. 8, n. 3, p. 201–212, 2013. ISSN 1745-2767. DOI:10.1080/17452759.2013.830939. Citado na página 24.
- SESHU, P. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. [S.l.]: PHI Learning Private Limited, 2003. ISBN 978-81-203-2315-5. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 53.
- SIGMUND, O. A 99 line topology optimization code written in matlab. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Springer, v. 21, n. 2, p. 120–127, 2001. ISSN 1615-1488. DOI:10.1007/s001580050176. Citado na página 52.
- SILVA, M. V. B. da. *Caracterização Mecânica de Materiais Utilizados em Prototipagem Rápida por Deposição de Material Fundido para Aplicação Aeroespacial*. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade de Brasília, 2018. Citado na página 92.

- SILVA, N. M. da. *Obtenção e avaliação mecanodinâmica de compósitos, ortotrópicos e anisotrópicos, com matriz polimérica reforçada com fibras de carbono ou poliaramida*. Tese (Doutorado) — Instituto de Pesquisas Energética e Nucleares (IPEN), 2005. Citado 3 vezes nas páginas 14, 47 e 48.
- SONG, Y. et al. Measurements of the mechanical response of unidirectional 3D printed PLA. *Materials & Design*, Elsevier, v. 123, p. 154–164, 2017. ISSN 0264-1275. DOI:10.1016/j.matdes.2017.03.051. Citado 3 vezes nas páginas 94, 95 e 98.
- SPENCER, A. The transverse moduli of fibre-composite material. *Composites Science and Technology*, Elsevier, v. 27, n. 2, p. 93–109, 1986. ISSN 0266-3538. DOI:10.1016/0266-3538(86)90066-7. Citado na página 45.
- STANSBURY, J. W.; IDACAVAGE, M. J. 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities. *Dental Materials*, Elsevier, v. 32, n. 1, p. 54–64, 2016. ISSN 0109-5641. DOI:10.1016/j.dental.2015.09.018. Citado 3 vezes nas páginas 24, 31 e 34.
- STRONG, A. B. *Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods, and Applications*. [S.l.]: Society of Manufacturing Engineers (SME), 2008. 159-161 p. ISBN 0-87263-854-5. Citado na página 31.
- SUAREZ, M. Ángel A. *Topology optimization for eigenvalue problems using polygonal finite elements*. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 53.
- TURNER, B. N.; GOLD, S. A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: Ii. materials, dimensional accuracy, and surface roughness. *Rapid Prototyping Journal*, Emerald, v. 21, n. 3, p. 250–261, 2015. ISSN 1355-2546. DOI:10.1108/RPJ-02-2013-0017. Citado 6 vezes nas páginas 9, 37, 38, 39, 40 e 98.
- ULTIMAKER. *Ultimaker Cura*. release 19 de Março de 2019. V. 4.0.0. Disponível em: <<https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-cura-software>>. Citado na página 60.
- UP3D. *PLA Premium filamento PLA de alta performance*. UP3D Impressoras 3D, 2019. Catálogo Online. Acessado em: 15 de Maio de 2019. Disponível em: <<https://d26lpennugtm8s.cloudfront.net/stores/028/617/rte/Filamentos%20PLA%20premium.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 58.
- WERNKE, A. P. et al. Análise de convergência do protótipo da fuselagem tubular de um avião aerodesign de competição sob uma abordagem estática. *Encontro de Ciência e Tecnologia*, 2016. Citado na página 54.
- WERNKE, A. P. et al. Active learning with practical engineering applications through the laicansat project. In: *Proceedings of the PAEE/ALE'2018, 10th International Symposium on Project Approaches in Engineering Education (PAEE) and 16th Active Learning in Engineering Education Workshop (ALE)*. Distrito Federal, Brasil: Project Approaches in Engineering Education (PEAA) / Active Learning in Engineering Education (ALE), 2018. Citado 3 vezes nas páginas 9, 42 e 43.
- WERNKE, A. P.; SOUSA, D. D.; BARCELOS JR., M. N. D. Projeto de extrusora de materiais poliméricos para fabricação e reciclagem de filamentos de impressora 3D. In: *Anais do XXV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica*. Asa Sul, Distrito Federal, Brasil: Associação Brasileira de Ciências Mecânica (ABCM), 2018. Citado na página 34.

WICHITA STATE UNIVERSITY. *Composite Materials Handbook - 17 Polymer Matrix Composites: Materials Properties*. [S.l.]: SAE International, 2012. v. 2. 20-24 p. ISBN 0-76807-823-7. Citado na página 157.

WILSON, C. A. C. The influence of surface-loading on the flexure of beams. *Philosophical and journal of magazine science*, Taylor & Francis, v. 32, n. 199, p. 481–503, 1891. DOI:[10.1080/14786449108620217](https://doi.org/10.1080/14786449108620217). Citado na página 66.

YANG, K. K. et al. Experimental validation of 3d printed material behaviors and their influence on the structural topology design. *Engineering*, Springer, v. 61, n. 5, p. 581–598, 2018. ISSN 1432-0924. DOI:[10.1007/s00466-018-1537-1](https://doi.org/10.1007/s00466-018-1537-1). Citado 6 vezes nas páginas 10, 25, 28, 50, 63 e 126.

ZIENKIEWICZA, O.; TAYLOR, R.; ZHU, J. *Textbook of Finite Element Analysis*. 7<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: Elsevier, 2013. ISBN 978-1-85617-633-0. Citado na página 54.

ZOU, R. et al. Isotropic and anisotropic elasticity and yielding of 3d printed material. *Composites Part B*, Elsevier, v. 99, p. 506–513, 2016. ISSN 1359-8368. DOI:[10.1016/j.compositesb.2016.06.009](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.009). Citado 2 vezes nas páginas 26 e 47.

# APÊNDICE A – Montagem e ajustes da impressora 3D

## A.1 Montagem

A montagem da impressora se deu início a partir das peças fornecidas, estas são mostradas em sua íntegra na Fig. A.1.



Figura A.1 – Peças da impressora desmontada.

A montagem foi seguida o manual na qual monta a impressora em duas etapas, primeiramente a etapa do frame e componentes mecânicos e em seguida os componentes eletrônicos. O Início da montagem é mostrada na Fig. A.2

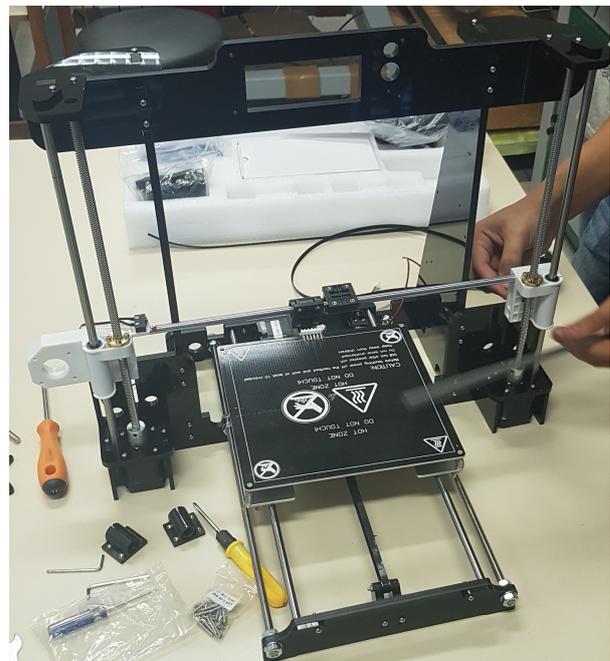


Figura A.2 – Início da montagem.

Algumas etapas de montagem são mostradas na Fig. A.3, esta representa a montagem do frame e dos componente mecânicos.



(a) Etapa de montagem do frame.



(b) Vista frontal da impressora (ANET, 2018).

Figura A.3 – Impressora Anet A8M *Double*.

Como mencionado na Seção 5.2.1 o software fatiador recomendado para utilização com a impressora é o Cura, este tem sua instalação no computador após o termino da montagem (Fig. A.4)

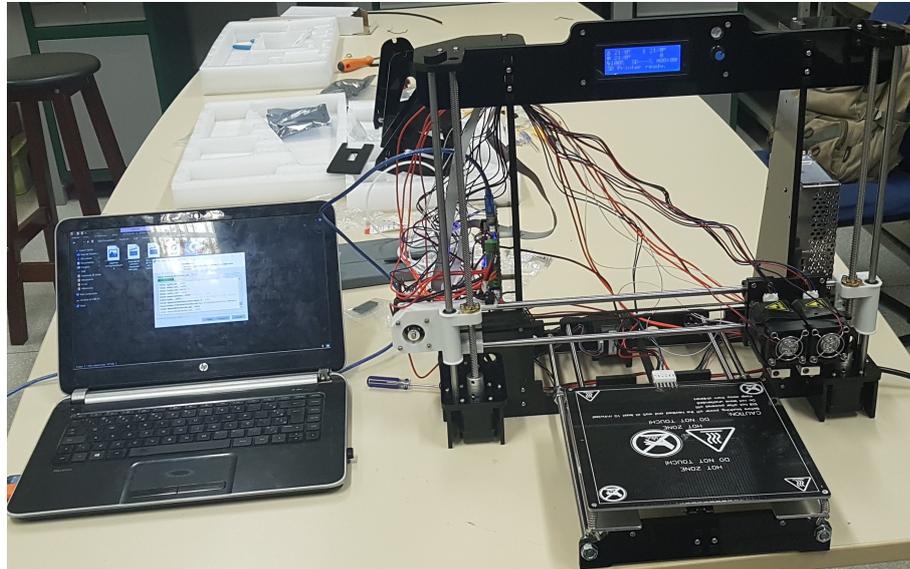


Figura A.4 – Instalação do software de fatiamento e funcionamento inicial.

Após isso é testado seu funcionamento como o apresentado na Fig. A.5, após esse teste a impressora está pronta para uso.

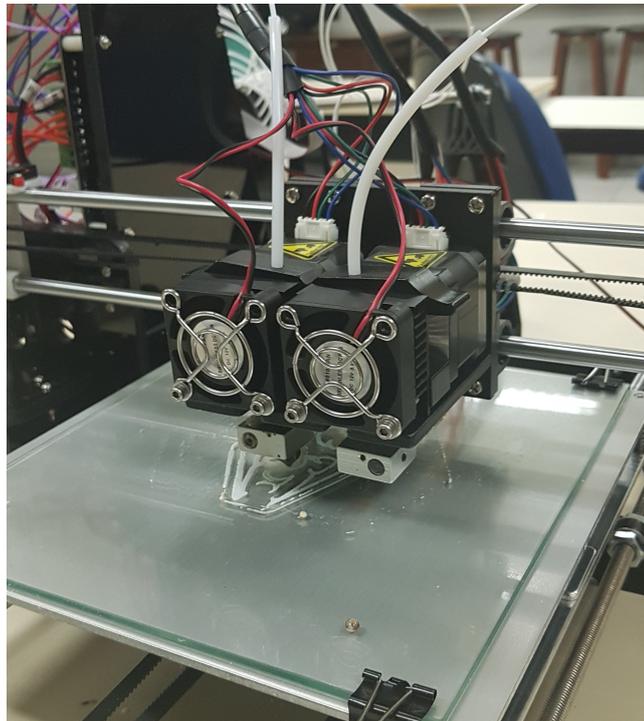


Figura A.5 – Impressora durante teste de funcionamento.

## A.2 Nivelamento de mesa

O nivelamento foi conduzido com a finalidade de obter uma precisão dimensional para todos os sentidos de impressão. Logo este é feito utilizando um cubo de calibração, este consiste em um cubo de aresta de 20mm.

### A.2.1 Nivelamento de mesa simples

O cubo é posicionado como o mostrado na Fig. A.6.

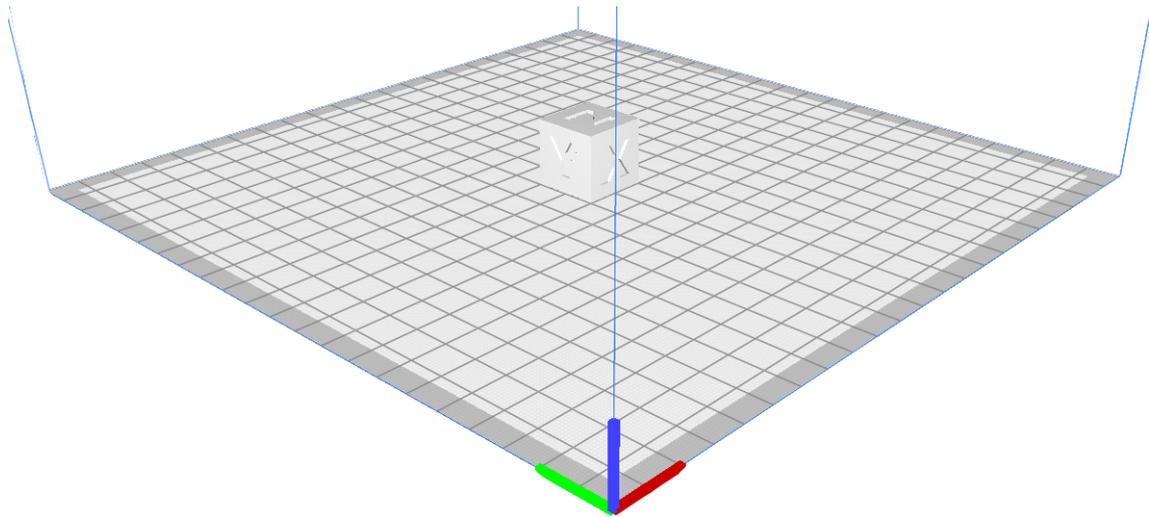


Figura A.6 – Posição do corpo de prova de nivelamento de mesa simples.

Tabela A.1 mostra as dimensões obtidas para os corpos de prova para nivelamento de mesa.

Tabela A.1 – Corpos de calibração do fluxo.

Num. Serial	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
CCCD_PLA_02020	20,10	20,00	19,78
CCCD_PLA_02020	20,00	20,14	20,50
CCCD_PLA_03030	20,00	20,00	21,00
CCCD_PLA_04040	19,98	20,02	21,00
CCCD_PLA_05050	19,82	20,00	20,74
CCCD_PLA_06060	20,00	19,98	19,90
CCCD_PLA_07070	19,92	20,00	19,98
CCCD_PLA_10080	19,92	20,04	20,00

Nota-se que os corpos de prova a partir do CCCD\_PLA\_06060 apresentam uma constância em suas dimensões, desta forma minimizando os erros dimensionais inerentes ao processo produtivo.

### A.3 Ajuste do fluxo de extrusão

O fluxo de extrusão precisa ser calibrado para ser alinhado com as configurações de impressão, este valor é mostrado na Tabela 5.3

Para isso é utilizado de um cubo semelhante ao explicado no Apêndice A.2, entretanto esse cubo é configurado como uma casca de parede igual a 0.8mm, aresta de 20mm e sem uma de suas faces.

O fluxo de calibração é a razão entre a espessura da parede projetada em relação a média das paredes impressas. Esta razão é expressa de forma trivial na Eq. A.1.

$$fluxo = \frac{3,2}{\sum_{i=1}^4 T_i} \quad (A.1)$$

Sendo  $T$  a espessura da parede.

Tabela A.2 mostra as dimensões obtidas para os corpos de prova de calibração do fluxo.

Tabela A.2 – Corpos de calibração do fluxo.

Num. Serial	T médio (mm)	Fluxo prévio ao ajuste	Fluxo pós ajuste
CCCF_PLA_01010	1,065	100%	75,117%
CCCF_PLA_02020	0,805		75,117%

Nota-se da Tabela A.2 que o corpo de teste CCCF\_PLA\_02020 apresenta um fluxo de calibração satisfatório.

## APÊNDICE B – Ajuste da deformação medida

A máquina utilizada para fazer os ensaios de tração e flexão (debatido na Seção 5.3.3), não indica os valores de deformação corretos, este possui uma relação linear direta com os valores obtidos pelo extensômetro, esta relação é mostrada na Fig. B.1.

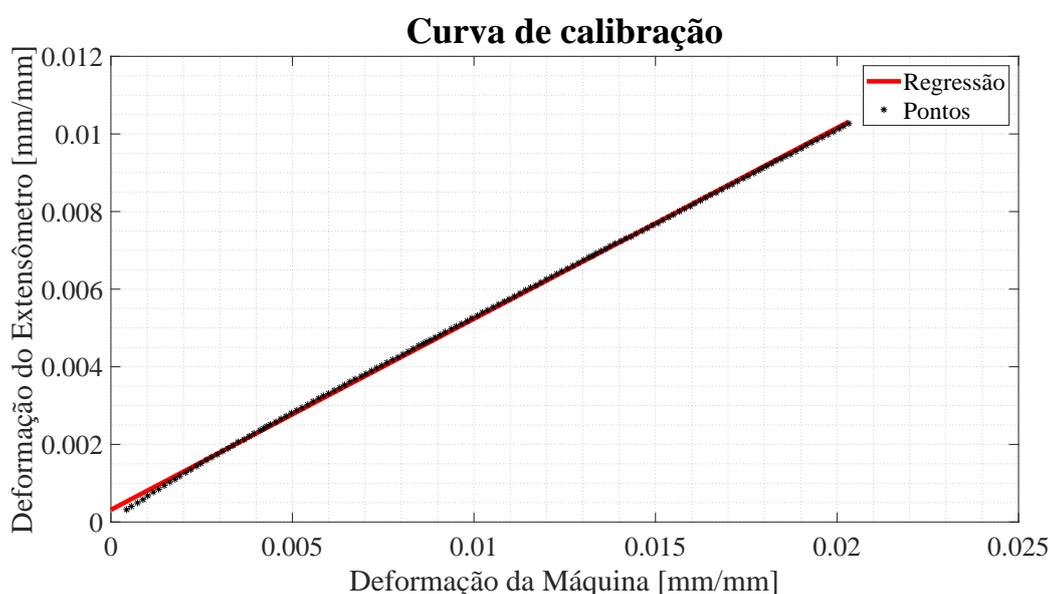


Figura B.1 – Relação entre deformação da máquina e do extensômetro.

Estes valores são igualados por um fator de 0,550, logo a deformação da máquina precisa ser multiplicada por esse fator para se aproximar do valor real.

A obtenção da reta mostrada na Fig. B.1 é feita através de uma regressão polinomial de primeiro grau, através da ferramenta *Curve Fitting* do MATLAB. Essa regressão tem a capacidade de descrever 99,92% dos dados experimentais (*R-square* de 0,9992), com excelente capacidade de predição (erro médio quadrado de  $7,994e-5$ ) e baixo erro randômico (Soma dos Quadrados Devido ao Erro de  $7,349e-7$ ).

# APÊNDICE C – Tabelas

## C.1 Detalhamento do número serial

Após fabricação dos corpos de prova é adotado um número serial, este é formado por uma nomenclatura única para cada corpo de prova, a nomenclatura adotada é mostrado abaixo.

'0'1'\_'2'\_'3'4'5'-'6'

No qual o número 0 indica a finalidade deste espécime, 1 indica o tipo de teste para qual foi projetado, 2 indica qual material foi utilizado, 3 indica qual o número sequencial de impressão independente do material, 4 indica o número de corpos de prova impressos de um mesmo material, 5 indica o sentido da medição de deformação e 6 é reservado a variações que podem ser omitidas caso não sejam aplicáveis, como otimização topológica e fabricação via dupla extrusão.

Exemplo e maior detalhamento de quais valores cada número pode assumir foi mostrado no Apêndice C.1.

Foram realizados 3 medições de massa para cada corpo de prova, a fim de determinar a densidade a partir do volume obtido em CAD. para realizar a medição da massa foi utilizada da balança digital Shimadzu modelo ATX 224, esta tem leitura de 0,1mg com desvio padrão  $\leq 0,1\text{mg}$ .

De acordo com o debatido na Seção 5.3.1 é necessário medir o corpo de prova para garantir que suas dimensões estão dentro das tolerâncias definidas pela norma, estas medições foram realizadas com paquímetro com capacidade de  $\pm 0,02\text{mm}$ .

Para diferenciação de cada tipo de corpo de prova é adotado um número serial, este é formado por uma nomenclatura única para cada corpo de prova. A base e os valores possíveis do número serial são mostrados na Tabela C.1.

Tabela C.1 – Número serial para corpos de prova.

Base do serial		
'0'1'_'2'_'3'4'5'-'6'		
Número	Significado	Valores possíveis

---

0	Finalidade da impressão	<ul style="list-style-type: none"><li>• CP = Corpo de prova</li><li>• CC = Cubo de calibração</li></ul>
1	Ensaio objetivado	<ul style="list-style-type: none"><li>• T = Tração</li><li>• F = Flexão</li><li>• CD = Calibragem dimensional</li><li>• CF = Calibragem do fluxo</li></ul>
2	Material no qual foi fabricado	<ul style="list-style-type: none"><li>• PLA</li><li>• PLAP (PLAPMMA)</li><li>• PLAC</li><li>• PETG</li><li>• PETGC</li></ul>
3	Número de corpos de prova impressos	<ul style="list-style-type: none"><li>• Número sequencial inteiro positivo</li></ul>
4	Número de corpos de prova impressos do mesmo material	<ul style="list-style-type: none"><li>• Número sequencial inteiro positivo</li></ul>

---

5	Sentido de medição do extensômetro	<ul style="list-style-type: none"><li>• 0 = Não aplicável</li><li>• 1 = Sentido xx, para cálculo de <math>\epsilon_{xx}</math></li><li>• 2 = Sentido yy, para cálculo de <math>\epsilon_{yy}</math></li></ul>
6	Variações omitíveis	<ul style="list-style-type: none"><li>• O = Otimização topológica</li><li>• S = Peça de exibição</li><li>• C = Impressão em conjunto</li></ul>

---

Desta forma podemos montar um número serial de exemplo, este é mostrado abaixo para um corpo de prova em situação hipotética.

CPT\_PLA\_18011

Este serial representa um corpo de prova (CP) para tração (T), feito de PLA, sendo o corpo de prova fabricado de número 18 (independente do material), sendo o primeiro (01) feito de PLA e com o objetivo de ser medido o  $\epsilon_{xx}$  (1).

## C.2 Características físicas de cada corpo de prova

A Tabela C.2 mostra as dimensões para cada corpo de prova de tração, sendo considerado mais e menos seu desvio padrão obtido através de medições em diferentes locais do corpo de prova.

Tabela C.2 – Características dimensionais de cada corpo de prova de tração.

Num. Serial	WO (mm)	T (mm)	W (mm)	LO (mm)	PI
CPT_PLA_01011	19,02±0,05	3,09±0,04	13,19±0,04	164,94±0,06	1
CPT_PLA_02021	19,07±0,08	3,15±0,05	13,11±0,03	164,80±0,04	1
CPT_PLA_03031	18,99±0,06	3,54±0,06	13,00±0,05	164,99±0,02	1
CPT_PLA_04041	18,89±0,05	3,36±0,03	13,01±0,12	164,88±0,12	1
CPT_PLA_05051	18,80±0,07	3,50±0,18	13,08±0,13	165,02±0,06	1
CPT_PLA_06061	18,94±0,06	3,36±0,09	13,09±0,06	164,89±0,09	1
CPT_PLA_07071	18,94±0,02	3,36±0,04	12,99±0,07	164,91±0,01	1
CPT_PLA_08081	18,95±0,07	3,50±0,08	13,04±0,06	164,99±0,02	1
CPT_PLA_09092	19,03±0,05	3,51±0,09	13,08±0,06	165,02±0,02	1
CPT_PLA_10102	18,94±0,02	3,51±0,08	12,98±0,05	165,17±0,28	1
CPT_PLA_11112	18,99±0,01	3,52±0,09	13,08±0,09	165,01±0,01	1
CPT_PLA_12122	19,03±0,05	3,56±0,09	13,08±0,03	165,02±0,02	1
CPT_PLA_13132	18,99±0,03	3,01±0,02	13,10±0,16	165,35±0,56	1
CPT_PLA_14142	19,04±0,14	3,07±0,06	13,00±0,00	165,02±0,02	1

Na Tabela C.3 é exibido as dimensões para cada corpo de prova de flexão, sendo considerado mais e menos seu desvio padrão.

Tabela C.3 – Características dimensionais de cada corpo de prova de flexão.

Num. Serial	b (mm)	d (mm)
CPF_PLA_01010	12,50±0,06	3,20±0,00
CPF_PLA_02020	12,73±0,03	3,19±0,01
CPF_PLA_03030	12,77±0,05	3,32±0,03
CPF_PLA_04040	12,72±0,03	3,33±0,03
CPF_PLA_05050	12,71±0,07	3,18±0,04
CPF_PLA_06060	12,74±0,07	3,30±0,01

A Tabela C.4 mostra as massas e densidades obtidas para cada corpo de prova, sendo considerado mais e menos seu desvio padrão para massa.

Tabela C.4 – Características de massa de cada corpo de prova.

Num. Serial	Massa (g)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
CPT_PLA_01011	7,715±1,00E-04	0,9191
CPT_PLA_02021	7,758±1,09E-04	0,9296
CPT_PLA_03031	7,766±5,77E-05	0,9252
CPT_PLA_04041	7,736±5,77E-05	0,9216
CPT_PLA_05051	7,766±1,15E-04	0,9251
CPT_PLA_06061	7,755±5,77E-05	0,9239
CPT_PLA_07071	7,753±5,77E-05	0,9249

---

CPT_PLA_08081	$7,783 \pm 5,77E-05$	0,9272
CPT_PLA_09092	$7,748 \pm 1,15E-04$	0,9230
CPT_PLA_10102	$7,744 \pm 1,73E-04$	0,9226
CPT_PLA_11112	$7,738 \pm 2,52E-04$	0,9218
CPT_PLA_12122	$7,783 \pm 1,53E-04$	0,9272
CPT_PLA_13132	$7,758 \pm 1,15E-04$	0,9242
CPT_PLA_14142	$7,764 \pm 5,77E-05$	0,9249

---

## APÊNDICE D – Plantas

As plantas disponibilizadas nesse apêndice são completamente feitas pelo autor deste estudo, sua reprodução é vetada sem a clara autorização escrita do autor.

Todos estas plantas são executadas através do *drafting* do CATIA V5R21, estas são representações feitas a partir de CADs de outras *workbenches*.

As plantas foram executadas seguindo as NBR (Norma Técnica) para desenho técnico em acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). As NBRs utilizadas são listadas abaixo:

NBR 8196 Desenho Técnico – Emprego de Escalas;

NBR 8402 Execução de Caractere para Escrita em Desenho Técnico;

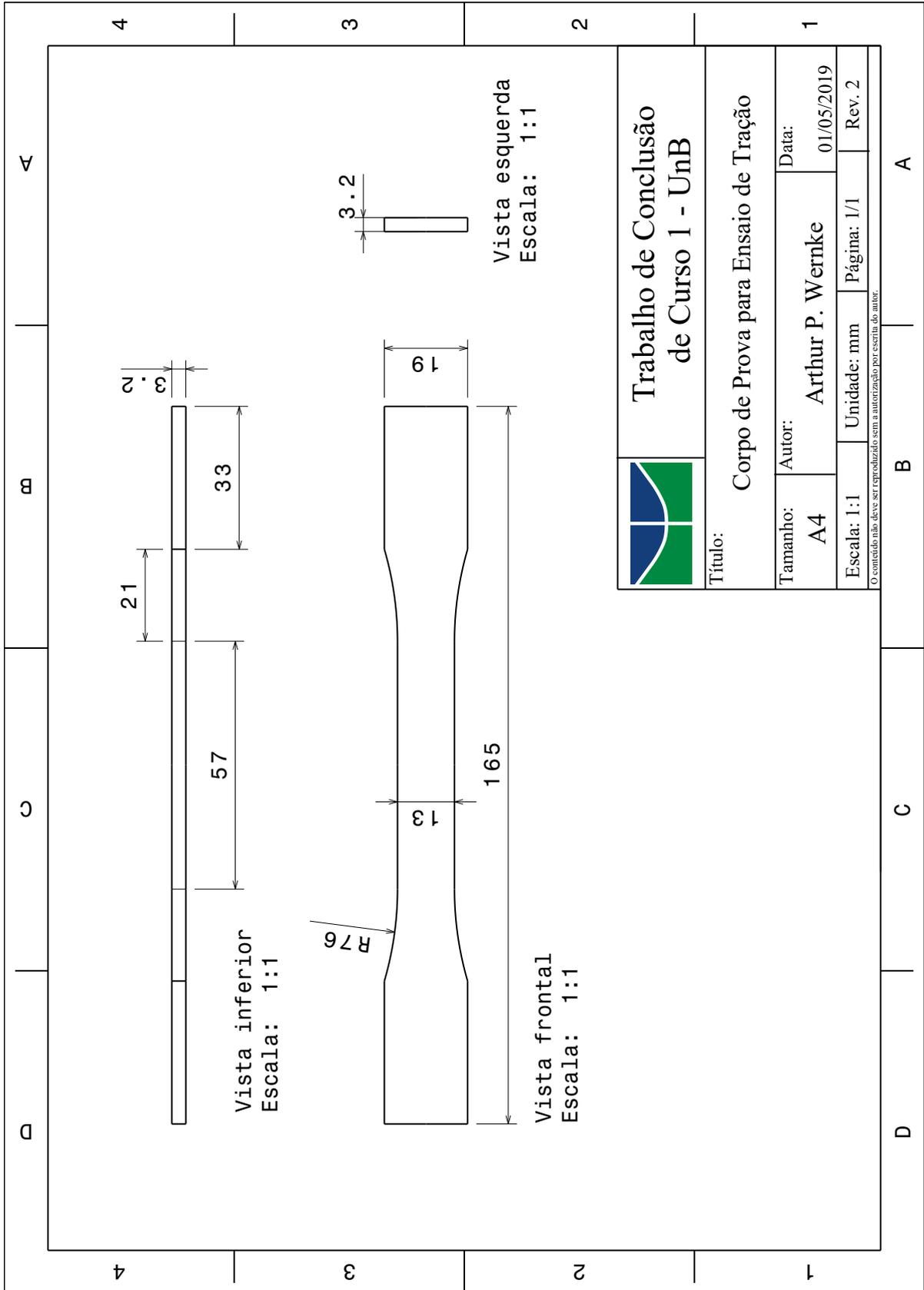
NBR 8403 Aplicação de Linhas em Desenho, Tipos de Linhas e Larguras das linhas;

NBR 10126 Cotagem em Desenho Técnico;

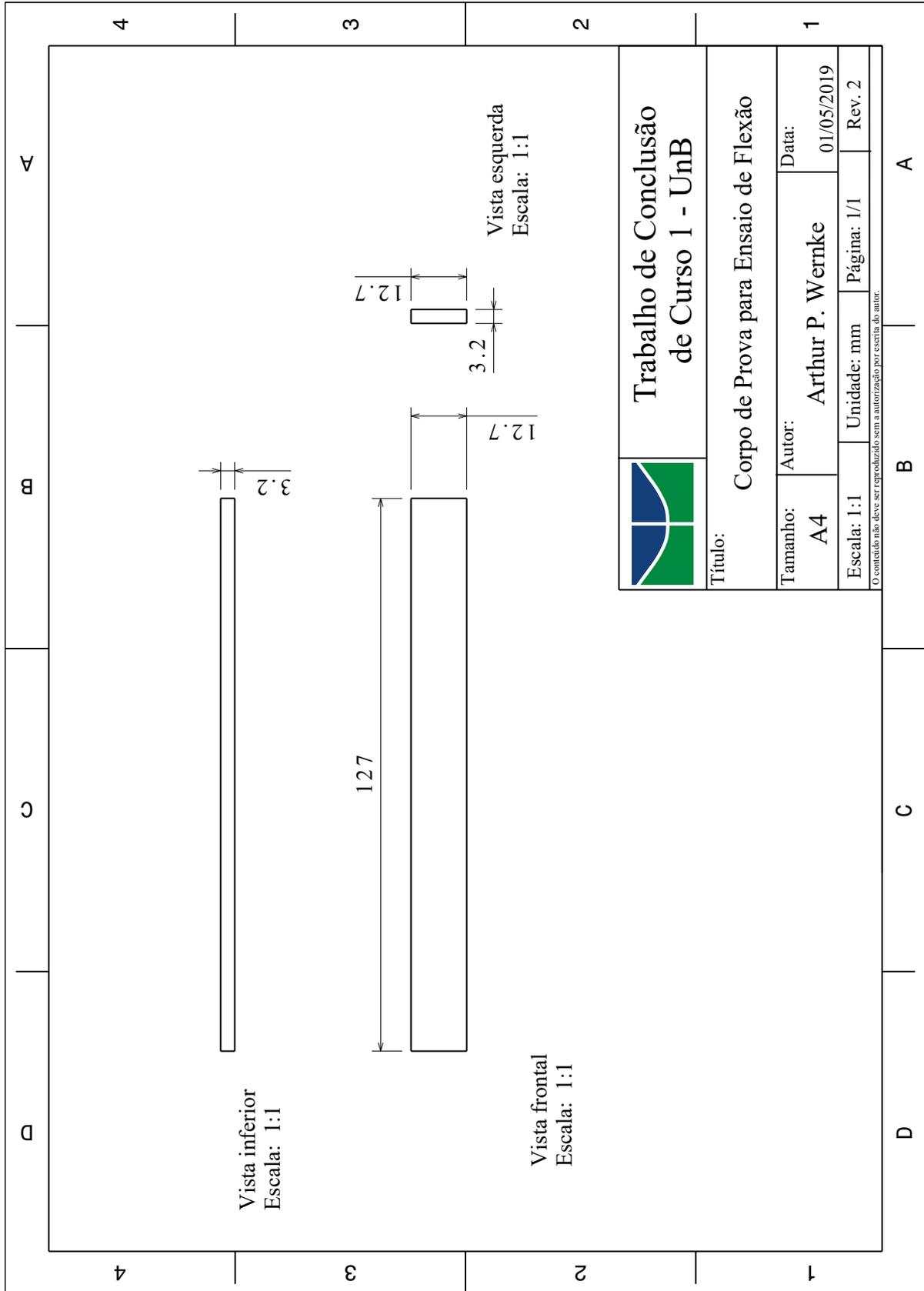
NBR 10582 Apresentação da folha para desenho técnico.

Vale ressaltar que descrever cada norma foge do escopo deste estudo e de sua temática, logo, o entendimento da norma e visualização dos itens descritos é recomendado a consulta referencial externa.

## D.1 Corpo de prova para tração



## D.2 Corpo de prova para flexão



Trabalho de Conclusão  
de Curso 1 - UnB

Título:

Corpo de Prova para Ensaio de Flexão

Tamanho:

A4

Autor:

Arthur P. Wernke

Data:

01/05/2019

Escala: 1:1

Unidade: mm

Página: 1/1

Rev. 2

O conteúdo não deve ser reproduzido sem a autorização por escrito do autor.

A

B

C

D

4

3

2

1

4

3

2

1

# APÊNDICE E – Sistema de coordenadas e padrões

## E.1 Sistema de Coordenadas

A maioria dos materiais compósitos tem uma forte dependência com o sistema de coordenadas utilizado para expressar suas propriedades, sendo estas dependentes da fase, fração em volume, orientação e geometria da fase dispersa (CALLISTER, 2006).

A orientação do material será separado em basicamente dois tipos, longitudinal e transversal, cada uma está orientada de acordo com o sistema de eixos 1-2-3, estes são mostrados na Fig. E.1.

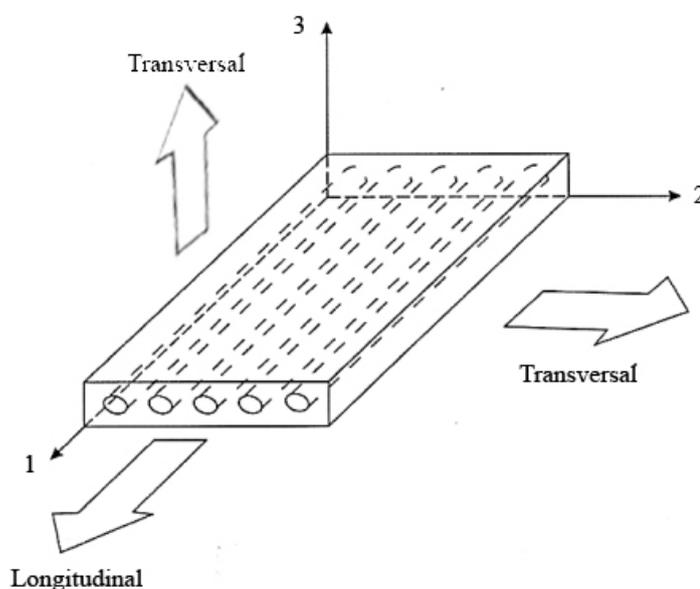


Figura E.1 – Esquemático demonstrando a definição dos sentido longitudinal e transversal em junção ao sentido dos eixos (Oliveira (2018) adaptado).

Figura E.2 mostra o sistema de coordenadas em relação a impressora, vale ressaltar que esse sistema coincide com o original da impressora 3D.

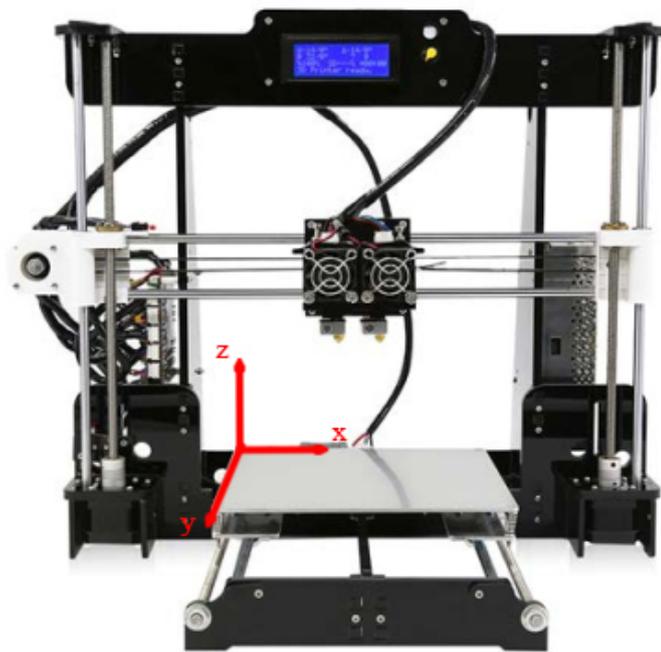


Figura E.2 – Sistema de coordenadas em relação a impressora 3D (Anet (2018) adaptado).

Em acordo com o *Composite Material Handbook - 17* (CMH-17) Volume 2 (WICHITA STATE UNIVERSITY, 2012) a orientação de cada lamina é indicada pelo ângulo entre a direção da fibra e a direção do eixo 1 (mostrado na Fig. E.1). Ângulos positivos são medidos anti-horário, ângulos em sentido horário são definidos como negativos.

## E.2 Código de orientação do material

O código utilizado no presente estudo para materiais compósitos com reforço por fibra segue as regras abaixo, vale ressaltar que estas regras estão de acordo com a CMH-17 (WICHITA STATE UNIVERSITY, 2012).

1. Colchetes são usados para indicar o início e o fim da notação:

$$\text{Início} \rightarrow [ \quad ] \leftarrow \text{fim}$$

2. A orientação de sucessivas laminas com diferentes ângulos são separados por barra (/). Exemplo  $[0/90]$  é um laminado com duas laminas, uma em  $0^\circ$  e outra em  $90^\circ$ .
3. Duas ou mais laminas seguidas com a mesma orientação são indicados pela adição de um subscrito, igual ao número de laminas com a mesma orientação. Exemplo  $[0/90_2/45]$  é um laminado com quatro laminas e pode ser reescrito como  $[0/90/90/45]$ .
4. O subscrito 's' é usado se o laminado possui simetria. Exemplo  $[0/90]_s$  repeta um laminado com quatro laminas, e pode ser reinterpretado como  $[0/90/90/0]$ .

5. Para uma organização simétrica com um número par de lâminas, a camada que não é repetida é indicada com uma sobre linha em cima do ângulo que não se repete. Exemplo  $[0/\overline{90}]_s$  representam um laminado com 3 camadas e pode ser reinterpretado como  $[0/90/0]$ .
6. Uma orientação de lamina na qual é posicionado repetida vezes em sequência é posicionado em parênteses com o número de repetições em subscrito. Exemplo  $[(\pm 45)_2/0/90]$  representa um laminado com seis camadas e pode ser reescrito como  $[+45/-45/+45/-45/0/90]$ .
7. Topo é definido como sendo a face livre da impressora 3D com sentido ao eixo  $z$  positivo, base é definido como a face posicionado contra a mesa de impressão.
8. Vertical é uma direção de impressão e sua classificação é semelhante a utilizada para os ângulos no plano. Exemplo, uma peça com sentido de impressão principal sendo o vertical recebe a nomenclatura  $[v]$ .