



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS – REGIONAL CATALÃO  
UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE MATEMÁTICA E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO



**Stéfany Mayara Ferreira de Rezende**

ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPONENTES  
CONFECCIONADOS POR MANUFATURA ADITIVA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

CATALÃO – GO, 2018

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR  
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES  
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico:       Dissertação       Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

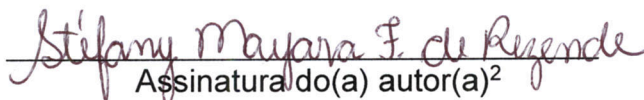
Nome completo do autor: Stéfany Mayara Ferreira de Rezende

Título do trabalho: Estudo e Caracterização de Componentes Confeccionados por Manufatura Aditiva

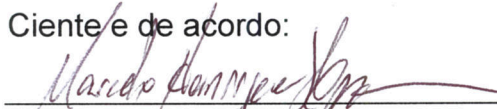
3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento  SIM       NÃO<sup>1</sup>

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.

  
Assinatura do(a) autor(a)<sup>2</sup>

Ciente e de acordo:

  
Assinatura do(a) orientador(a)<sup>2</sup>

Data: 11 / 05 / 2018

<sup>1</sup> Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

<sup>2</sup> A assinatura deve ser escaneada.

STÉFANY MAYARA FERREIRA DE REZENDE

ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPONENTES  
CONFECCIONADOS POR MANUFATURA ADITIVA

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Modelagem e Otimização pela Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão.

Orientador:  
Marcelo Henrique Stoppa

CATALÃO – GO

2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Rezende, Stéfany Mayara Ferreira  
Estudo e Caracterização de Componentes Confeccionados por Manufatura Aditiva [manuscrito] / Stéfany Mayara Ferreira Rezende. 2018.  
134 f.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Henrique Stoppa.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Catalão, Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização, Catalão, 2018.  
Apêndice.  
Inclui siglas, abreviaturas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Manufatura Aditiva. 2. Propriedades Mecânicas. 3. Ácido Poliláctico. 4. Acrilonitrila-Butadieno-Estireno. I. Stoppa, Marcelo Henrique, orient. II. Título.

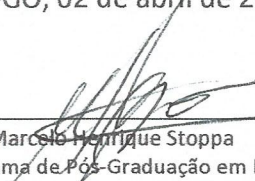
CDU 62:61

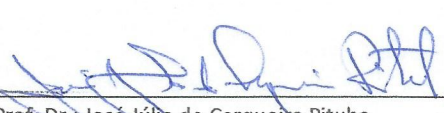



**Ata de Defesa Pública – Dissertação de Mestrado**


Aos dois dias do mês de abril do ano de 2018, às 15h:00 min, reuniram-se os componentes da banca examinadora, professores Dr. Marcelo Henrique Stoppa (presidente e orientador), Dr. Donald Mark Santee, Dr. José Júlio de Cerqueira Pituba e para, em sessão pública realizada no Laboratório de Controle Operacional, da Regional Catalão (RC), da Universidade Federal de Goiás (UFG), procederem com a avaliação do trabalho intitulado: “Estudo e Caracterização de Componentes Confeccionados por Manufatura Aditiva”, em nível de Mestrado, área de concentração *Modelagem e Otimização*, de autoria de Stéfany Mayara Ferreira de Rezende, discente do Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização (PPGMO) da UFG/RC. A sessão foi aberta pelo presidente da banca, que fez a apresentação formal dos membros da banca. A seguir, a palavra foi concedida ao discente que, dentro do tempo regulamentar, procedeu a apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o candidato, tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação do trabalho. Os membros da banca consideraram o trabalho final: (  ) **Aprovado** ou (  ) **Reprovado**. Cumpridas as formalidades de pauta, às 16 h: 40 min a presidência da mesa encerrou a sessão e para constar, eu Marcelo H. Stoppa, lavrei a presente Ata que, depois de lida e aprovada, segue assinada pelos membros da banca examinadora e pelo discente e, posteriormente, será homologada pelo Colegiado do PPGMO.

Catalão-GO, 02 de abril de 2018.

  
Prof. Dr.: Marcelo Henrique Stoppa  
Programa de Pós-Graduação em Modelagem e  
Otimização, UFG/RC.  
(Presidente da Banca)

  
Prof. Dr.: José Júlio de Cerqueira Pituba  
Faculdade de Engenharia, UFG/RC.

  
Prof. Dr.: Donald Mark Santee  
Programa de Pós-Graduação em Modelagem e  
Otimização, UFG/RC.

  
Discente: Stéfany Mayara Ferreira de Rezende  
Programa de Pós-Graduação em Modelagem e  
Otimização, UFG/RC.



*Aos meus pais, Adriano e Luzia. Aos meus irmãos, Stanerty e Stanley. Ao meu avô Antônio. In  
memorian às minhas avós, Aparecida e Maria.*



---

# Agradecimentos

---

Agradeço a Deus, por sempre me amparar, proteger e guiar e por me ajudar a ser uma pessoa cada vez melhor.

À Santa Clara, por me iluminar e me amparar em todos os momentos de aflição e preocupação com o andamento desse trabalho.

Aos meus pais, Adriano e Luzia, pelos exemplos de humildade e fé e por toda a compreensão e amor.

Aos meus irmãos, Stanerty e Stanley, por todo apoio e carinho, sendo meus alicerces nos momentos mais difíceis.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo Henrique Stoppa, por toda paciência e incentivo durante a execução da pesquisa. Obrigada por todos os ensinamentos e palavras de encorajamento.

Agradeço ainda ao Prof. Dr. Donald Mark Santee, pelo auxílio prestado durante a realização desse estudo.

Ao meu amigo-irmão Bruno Alves Maia, que muito me ensinou nessa caminhada. Com seu apoio, consegui vencer mais esse desafio em minha vida. Amizade essa que será levada para a vida inteira.

Ao meu amigo José Salviano, pelo apoio e companheirismo em todas as horas.

Ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás Regional Catalão e a FAPEG pelo suporte financeiro.

À todos aqueles que, de alguma forma, doaram um pouco de si para a realização desse trabalho.

À todos, os meus sinceros agradecimentos.



*O sucesso nada mais é, que ir de fracasso em fracasso, sem que se perca o entusiasmo.*

*Winston Churchill*



# RESUMO

REZENDE, STÉFANY MAYARA FERREIRA. *Estudo e Caracterização de Componentes Confeccionados por Manufatura Aditiva*. 2018. 134 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem e Otimização) – Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, Catalão – GO.

Diversas são as técnicas utilizadas para a manufatura de modelos tridimensionais, contudo em virtude de sua facilidade de uso, a impressão 3D por extrusão de material tem sido largamente empregada, desde em áreas específicas como medicina como para uso pessoal. Tais fatores indicam, que nos próximos anos, muitos dos produtos plásticos de uso cotidiano, comumente produzidos por métodos convencionais, serão substituídos por objetos impressos em casa, tendo em vista a minimização de custos e a customização. Voltando-se para a ampliação da aplicabilidade da impressão 3D em engenharia, é fundamental conhecer a influência dos parâmetros de processo de modo a assegurar o bom desempenho dos produtos confeccionados por esta tecnologia. Dessa forma, este trabalho dedica-se ao estudo das propriedades mecânicas de peças construídas por extrusão de material e a influência de parâmetros do material e do processo de impressão, nas características finais do objeto produzido. Uma breve revisão da literatura é realizada visando conhecer as propriedades mecânicas identificadas e quais os métodos mais empregados. Foi identificado que a orientação de impressão e o entretelas afetam relevantemente as propriedades mecânicas da peça impressa. Por outro lado, uma abordagem experimental também é utilizada objetivando avaliar a influência dos parâmetros, forma e porcentagem de preenchimento, na resistência mecânica dos objetos confeccionados. Além disso, foi efetuado estudo inicial e introdutório tendo em vista analisar as características funcionais de uma prótese de mão confeccionada por manufatura aditiva. A realização do mesmo, visa identificar as limitações do dispositivo e propiciar melhorias futuras.

**Palavras-chaves:** Manufatura Aditiva, Propriedades Mecânicas, Ácido Poliláctico, Acrilonitrila-Butadieno-Estireno.



# ABSTRACT

REZENDE, STÉFANY MAYARA FERREIRA. *Study and Characterization of Components Made by Additive Manufacturing*. 2018. 134 f. Master Thesis in Modelling and Optimization – Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, Catalão – GO.

There are several techniques used for the manufacture of three-dimensional models, but due to their ease of use, material extrusion has been widely applied in specific areas, since such as engineering as personal use. Such factors indicate that in the coming years many of the everyday plastic products commonly produced by conventional methods will be replaced by home printed objects in order to minimize costs and customization. Thus, knowing the influence of the process parameters is fundamental for the good performance of the products made by this technology. Thus, this work is dedicated to the study of the mechanical properties of parts constructed by material extrusion and the influence of parameters of the material and the printing process on the final characteristics of the produced object. A brief review of the literature is carried out in order to know the mechanical properties already identified and which methods are most used. It has been identified that the mechanical properties of the printed pieces are significantly affected by the printing orientation parameters and airgap. An experimental approach is used, aiming to evaluate the influence of parameters, shape and fill percentage, on the mechanical strength of the made objects. In addition, an initial and introductory study was carried out in order to analyze the functional characteristics of a prosthesis made by additive manufacture. The accomplishment of the same, aims to identify the limitations of the device and to provide future improvements.

**Keywords:** Additive Manufacturing, Mechanical Properties, Polylactic Acid, Acrylonitrile-Butadiene-Styrene.



---

# LISTA DE FIGURAS

---

Figura 2.1 – Objeto fatiado. . . . .	33
Figura 2.2 – Processo de impressão por extrusão de material. . . . .	34
Figura 2.3 – Exemplificação Básica da Formação de um Polímero. . . . .	35
Figura 2.4 – Resumo do Processo de Obtenção do ABS. . . . .	39
Figura 2.5 – Representação Gráfica da Estrutura Química do Copolímero ABS. . . . .	39
Figura 2.6 – Formas Enantioméricas do PLA. . . . .	41
Figura 2.7 – Exemplo de prótese de mão confeccionada por impressão 3D. . . . .	44
Figura 2.8 – Modelo de prótese de mão disponível para livre compartilhamento (Rap- tor Reloaded). . . . .	48
Figura 2.9 – Prótese mecânica anatômica. . . . .	49
Figura 2.10 – Visão detalhada da prótese ALX (sem dedos). . . . .	49
Figura 2.11 – Prótese ALX. . . . .	50
Figura 2.12 – Dedos: (a) polegar, (b) indicador, (c) médio, (d) anular, (e) mínimo. . . . .	51
Figura 2.13 – Composição do antebraço. . . . .	51
Figura 2.14 – Sistema de compensação dos dedos da prótese ALX. . . . .	52
Figura 4.1 – Modelo de Corpo de prova. . . . .	61
Figura 4.2 – Dimensões do Corpo de prova. . . . .	62
Figura 4.3 – Confeção das amostras em impressora 3D. . . . .	64
Figura 4.4 – Identificação dos corpos de prova . . . . .	65
Figura 4.5 – Armazenamento dos modelos de teste. . . . .	65
Figura 4.6 – Sistema de teste universal servo-hidráulico - Laboratório de Estruturas. . . . .	68
Figura 4.7 – Corpos de prova - Primeira sessão de ensaios (Castanha prismática). . . . .	68
Figura 4.8 – Continuação Corpos de prova - Primeira sessão de ensaios (Castanha pris- mática). . . . .	69
Figura 4.9 – Modelo de suporte para aperto do corpo de prova na máquina de teste (versão 1). . . . .	70
Figura 4.10 – Modelo de suporte para aperto do corpo de prova na máquina de teste (versão 2). . . . .	70
Figura 4.11 – Base centralizadora para o suporte. . . . .	71

Figura 4.12 –Corpo de prova centralizado para teste. . . . .	71
Figura 4.13 –Corpos de Prova - Segunda sessão de ensaios. . . . .	72
Figura 4.14 –Corpos de prova - Segunda sessão de ensaios (preso sem suporte com castanha cilíndrica). . . . .	72
Figura 4.15 –Modelo de suporte para aperto do corpo de prova na máquina de teste (versão 3). . . . .	73
Figura 4.16 –Corpo de prova preso a máquina de tração com o auxílio do suporte. . . .	73
Figura 5.1 – Representação gráfica dos resultados médios obtidos para o ABS (ângulo 0°). . . . .	78
Figura 5.2 – Representação gráfica dos resultados médios obtidos para o ABS (ângulo 45°). . . . .	79
Figura 5.3 – Representação gráfica dos resultados médios obtidos para o PLA (ângulo 0°). . . . .	80
Figura 5.4 – Representação gráfica dos resultados médios obtidos para o PLA (ângulo 45°). . . . .	80
Figura 5.5 – Resultados do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 0° (Retilinear). . . . .	83
Figura 5.6 – Gráfico do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 0° (Retilinear). . . . .	83
Figura 5.7 – Resultados do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 45° (Retilinear). . . . .	84
Figura 5.8 – Gráfico do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 45° (Retilinear). . . . .	84
Figura 5.9 – Resultados do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 0° (Colméia). . . . .	85
Figura 5.10 –Gráfico do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 0° (Colméia). . . . .	85
Figura 5.11 –Resultados do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 45° (Colméia). . . . .	86
Figura 5.12 –Gráfico do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 45° (Colméia). . . . .	86
Figura 5.13 –Resultados do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 0° (Linear). . . . .	87
Figura 5.14 –Gráfico do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 0° (Linear). . . . .	87
Figura 5.15 –Resultados do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 45° (Linear). . . . .	88
Figura 5.16 –Gráfico do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 45° (Linear). . . . .	88

Figura 5.17–Resultados do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 0° (Retilinear). . . . .	89
Figura 5.18–Gráfico do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 0° (Retilinear). . . . .	89
Figura 5.19–Resultados do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 45° (Retilinear). . . . .	90
Figura 5.20–Gráfico do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 45° (Retilinear). . . . .	90
Figura 5.21–Resultados do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 0° (Colméia). . . . .	91
Figura 5.22–Gráfico do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 0° (Colméia). . . . .	91
Figura 5.23–Resultados do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 45° (Colméia). . . . .	92
Figura 5.24–Gráfico do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 45° (Colméia). . . . .	92
Figura 5.25–Resultados do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 0° (Linear). . . . .	93
Figura 5.26–Gráfico do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 0° (Linear). . . . .	93
Figura 5.27–Resultados do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 45° (Linear). . . . .	94
Figura 5.28–Gráfico do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 45° (Linear). . . . .	94
Figura 5.29–Resposta da resistência à tração mensurada e prevista (Polímero PLA). . . . .	98
Figura 5.30–Resposta da resistência à tração mensurada e prevista (Polímero ABS). . . . .	100
Figura 5.31–Gráfico para análise de independência dos dados (PLA-Colméia). . . . .	105
Figura 5.32–Gráfico para análise de independência dos dados (PLA-Linear). . . . .	106
Figura 5.33–Gráfico para análise de independência dos dados (PLA-Retilinear). . . . .	107
Figura 5.34–Gráfico para análise de independência dos dados (ABS-Colméia). . . . .	108
Figura 5.35–Gráfico para análise de independência dos dados (ABS-Retilinear). . . . .	109
Figura 5.36–Gráfico para análise de independência dos dados (ABS-Linear). . . . .	110
Figura 5.37–Resposta da resistência à tração mensurada e prevista, modelos simplificados (Polímero PLA). . . . .	111
Figura 5.38–Resposta da resistência à tração mensurada e prevista, modelos simplificados (Polímero ABS). . . . .	112
Figura 6.1 – Dinamômetro de mão eletrônico. . . . .	115
Figura 6.2 – Procedimento experimental para leitura da preensão palmar da prótese de biônica ALX. . . . .	116

Figura 6.3 – Dinamômetro Digital Portátil. . . . .	117
Figura 6.4 – Leitura da capacidade de tração do sistema de controle eletromecânico da prótese de biônica ALX - dedos individuais. . . . .	118
Figura 6.5 – Leitura da capacidade de tração do sistema de controle eletromecânico da prótese de biônica ALX - Dedos em conjunto. . . . .	119
Figura 6.6 – Leitura da capacidade de tração do sistema de controle eletromecânico da prótese de biônica ALX. . . . .	119

---

# LISTA DE TABELAS

---

Tabela 2.1 – Principais tipos de processos de impressão 3D. . . . .	32
Tabela 2.2 – Classificação dos copolímeros. . . . .	36
Tabela 2.3 – Propriedades Aperfeiçoadas com a Copolimerização do ABS. . . . .	40
Tabela 2.4 – Propriedades Físicas do PLA Copolimerizado. . . . .	43
Tabela 2.5 – Efeito da Cristalinidade nas Propriedades Mecânicas do PLA. . . . .	43
Tabela 2.6 – Resumo comparativo das propriedades do PLA, PS e PET. . . . .	44
Tabela 2.7 – Exemplos de próteses de mão de livre compartilhamento. . . . .	45
Tabela 2.8 – Estimativa de custo das próteses de mão fabricadas por processos atuais (*1000). . . . .	47
Tabela 3.1 – Visão geral dos trabalhos envolvendo a caracterização de materiais de peças impressas. . . . .	60
Tabela 4.1 – Parâmetros de impressão variáveis. . . . .	63
Tabela 4.2 – Parâmetros de impressão fixos. . . . .	63
Tabela 4.3 – Configurações dos Corpos de Prova. . . . .	64
Tabela 4.4 – Configurações dos Corpos de Prova. . . . .	74
Tabela 4.5 – Configurações dos Corpos de Prova. . . . .	75
Tabela 5.1 – Resistência média (MPa) dos componentes impressos em ABS com variação de preenchimento adotando o ângulo de impressão de 0°. . . . .	77
Tabela 5.2 – Resistência média (MPa) dos componentes impressos em ABS com variação de preenchimento adotando o ângulo de impressão de 45°. . . . .	78
Tabela 5.3 – Resistência média (MPa) dos componentes impressos em PLA com variação de preenchimento adotando o ângulo de impressão de 0°. . . . .	79
Tabela 5.4 – Resistência média (MPa) dos componentes impressos em PLA com variação de preenchimento adotando o ângulo de impressão de 45°. . . . .	80
Tabela 5.5 – Estatísticas Modelo de Predição da Resistência à Tração do PLA-Colméia. . . . .	96
Tabela 5.6 – Estatísticas Modelo de Predição da Resistência à Tração do PLA-Linear. . . . .	96
Tabela 5.7 – Estatísticas Modelo de Predição da Resistência à Tração do PLA-Retilinear. . . . .	97
Tabela 5.8 – Resposta do modelo de predição para o termoplástico PLA. . . . .	97
Tabela 5.9 – Estatísticas Modelo de Predição da Resistência à Tração do ABS-Colméia. . . . .	98



---

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

---

ABS — Acrilonitrila-butadieno-estireno

ASA — Acrilonitrila Estireno Acrílico

CAD — *Computer Aided Design*

DMLS — *Direct Metal Laser Sintering*

FDM — *Fused Deposition Modeling*

GP — Grau de Polimerização

LaMoP3D — Laboratório de Modelagem e Prototipagem 3D

ME — *Material Extrusion*

NENA — Núcleo de Tecnologia Assistiva

PE — Polietileno

PET-G — Polietileno Tereftalato modificado com Glicol

PLA — Ácido polilático

PP — Polipropileno

PS — Poliestireno

SAN — Copolímero de Estireno-acrilonitrila

SLA — *Stereolithography*

SLS — *Selective Laser Sintering*



---

# SUMÁRIO

---

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>25</b>
1.1	Objetivos e Justificativa	27
1.2	Metodologia de Pesquisa	27
1.3	Estrutura da Dissertação	28
<b>2</b>	<b>Tecnologia de Impressão por Extrusão de Material</b>	<b>31</b>
2.1	Propriedades Gerais dos Termoplásticos Empregados na Extrusão de Material	35
2.1.1	Conceitos Fundamentais	35
2.1.2	Classificação dos polímeros	37
2.1.2.1	Quanto ao comportamento mecânico	37
2.1.2.2	Quanto ao desempenho mecânico	37
2.2	Materiais Polímeros Usados na Tecnologia de Impressão por Extrusão de Material	38
2.2.0.3	Obtenção do Polímero ABS	38
2.2.0.4	Obtenção do Polímero PLA	41
2.3	Contribuição da Manufatura Aditiva na Confecção de Próteses de Mão	44
2.4	Prótese de Mão Confeccionada por MA Desenvolvida no LaMoP3D	47
2.4.1	Prótese Biônica - ALX	48
<b>3</b>	<b>Estado da arte da Caracterização de Materiais Termoplásticos</b>	<b>55</b>
<b>4</b>	<b>Materiais e Métodos</b>	<b>61</b>
4.1	Teste de Tukey	66
4.2	Procedimento Experimental	67
<b>5</b>	<b>Caracterização dos Materiais Termoplásticos ABS e PLA</b>	<b>77</b>
5.1	Aplicação do Método de Tukey	81
5.2	Modelo de Predição da Resistência à Tração de Componentes Impressos com Termoplásticos PLA e ABS	94
5.3	Simplificação dos Modelos de Predição da Resistência à Tração de Componentes Impressos em Termoplásticos PLA e ABS	101
<b>6</b>	<b>Análise Básica da Prótese Biônica ALX</b>	<b>113</b>
<b>7</b>	<b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>121</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>125</b>
	<b>APÊNDICE A Roteiro de Impressão dos Corpos de Prova</b>	<b>133</b>



## Capítulo 1

---

# Introdução

---

A impressão 3D, também conhecida como manufatura aditiva (MA), tem despertado grande interesse em diversas áreas de fabricação em virtude das vantagens dessa nova técnica de produção em relação aos métodos convencionais (TORRADO *et al.*, 2015).

Em geral, a impressão 3D permite um alto nível de personalização do produto, diferentemente de métodos tradicionais como fundição, moldagem ou usinagem (LEE; ABDULLAH; KHAN, 2005). Além disso, também apresenta alta capacidade em manufaturar geometrias complexas, menores quantidades de resíduos, custo de fabricação, impactos ambientais, em virtude da possibilidade de utilizar materiais biodegradáveis, entre outros (TORRADO *et al.*, 2015; IVANOVA; WILLIAMS; CAMPBELL, 2013). Contudo, limitações deste tipo de manufatura, tais como baixa resistência à força e à temperatura e a anisotropia das peças impressas, ainda são pouco abordadas. As impressoras existentes vêm sendo rapidamente modificadas a fim de melhorar a sua precisão e desempenho. Entretanto, restrições materiais e dificuldades em analisar as características do processo têm dificultado a superação destas limitações (CHRISTIYAN; CHANDRASEKHAR; VENKATESWARLU, 2016).

As características finais dos objetos são influenciadas por diversos fatores, como: variações nos parâmetros de confecção das peças e/ou na fabricação dos insumos (filamentos), condições ambientais e operacionais, tipo de material, tipo de impressora utilizada, dentre outros (IVANOVA; WILLIAMS; CAMPBELL, 2013).

A anisotropia do material causada pela construção da peça camada a camada, é uma característica usualmente notada nos objetos fabricados a partir de alguns tipos de impressão 3D, dentre elas a impressão por extrusão de material. Esta propriedade mecânica é comumente verificada por meio da análise de resistência à tração efetuada nos componentes fabricados, considerando diferentes direções e configurações, conforme se observa nos trabalhos Kumar *et al.* (2015), Wittbrodt e Pearce (2015), Onwubolu e Rayegani (2014), Ahn *et al.* (2002), Christiyan, Chandrasekhar e Venkateswarlu (2016).

Apesar da existência de diversas técnicas de impressão 3D, capazes de propiciar uma

menor anisotropia, a impressão por extrusão de material é a mais comum, barata e simples em comparação às demais.

As primeiras versões das impressoras 3D utilizavam apenas termoplásticos e em muitos casos as peças fabricadas necessitavam de pós-processamento ou apresentavam certa fragilidade. Com o crescente avanço científico, observou-se uma redução desta necessidade, além disso algumas técnicas de impressão 3D já são capazes de utilizar uma vasta gama de materiais, incluindo alumínio, níquel, aço, titânio, polímeros diversos e cerâmicos (IVANOVA; WILLIAMS; CAMPBELL, 2013; BERMAN, 2012).

A combinação entre materiais tem sido bastante comum, visando a melhoria de propriedades mecânicas desejadas. Algumas aplicações foram abordadas por [Torrado \*et al.\* \(2015\)](#) que estudou a adição de materiais como dióxido de titânio e óxido de zinco, entre outros e [Christiyan, Chandrasekhar e Venkateswarlu \(2016\)](#) que analisou a adição de silicato de magnésio hidratado, ambos em material termoplástico. Todavia, tais procedimentos não são aplicáveis para usuários domésticos, que muitas vezes possuem acesso aos materiais básicos para impressão.

Atualmente os materiais mais comuns no processo por extrusão de material são o acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) e o ácido polilático (PLA), uma vez que estes materiais possuem temperaturas de extrusão baixas o bastante para se utilizar fora de instalações não específicas, porém altas o bastante para conservar a forma em médias temperaturas de uso (TYMRAK; KREIGER; PEARCE, 2014).

O foco deste trabalho consiste em investigar as propriedades mecânicas de objetos confeccionados por impressão 3D, pela técnica de extrusão de material (ME). Nesse âmbito, foi efetuado a caracterização dos termoplásticos ABS e PLA, os quais são empregados na confecção de próteses de mão de baixo custo desenvolvidas no Laboratório de Modelagem e Prototipagem 3D (LaMoP3D). Para tanto, foi utilizada uma abordagem teórico-experimental, tendo em vista identificar e determinar a resistência à tração das peças impressas, por intermédio de estudos presentes na literatura e de ensaios de tração feitos pela autora. Ainda, foi realizada a análise das características mecânicas da prótese de mão ALX (confeccionada por MA e desenvolvida no LaMoP3D), tendo em vista a obtenção de maiores informações de sua funcionalidade.

Em suma, esse estudo buscou avaliar o efeito dos parâmetros forma e porcentagem de preenchimento nas características finais dos modelos construídos, bem como obter maior compreensão das limitações e funcionalidades do dispositivo protético estudado.

## 1.1 **Objetivos e Justificativa**

De maneira geral, o objetivo deste trabalho é investigar as propriedades mecânicas dos materiais polímeros empregados na confecção de dispositivos protéticos de baixo custo pela técnica de impressão ME, bem como obter maiores conhecimentos das funcionalidades e limitações da prótese de membro superior ALX. A partir das investigações realizadas, busca-se desenvolver um banco de dados contendo informações relativas às características mecânicas dos objetos confeccionados por impressão 3D, além de fornecer subsídios para futuras melhorias no protótipo estudado.

A fim de alcançar tais objetivos, realizam-se ensaios experimentais de tração nos componentes impressos por essa tecnologia e análises iniciais no protótipo físico da prótese. Espera-se, que as informações obtidas forneçam limiares de desempenho dos objetos confeccionados, e propicie a determinação de propriedades específicas no que tange a resistência à tração de tais materiais, a partir da variação dos parâmetros do processo.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Fazer um levantamento bibliográfico das características principais e aplicações dos materiais: ABS e PLA;
- Comparar os métodos empregados para a caracterização dos materiais em estudo, bem como quais as propriedades mecânicas já foram identificadas.
- Realizar um procedimento experimental para mensurar a resistência à tração dos modelos de teste impressos;
- Construir um banco de dados a partir dos resultados obtidos;
- Analisar o desempenho funcional do protótipo físico da prótese de mão impressa ALX;
- Identificar possíveis limitações e possibilidades de melhorias na prótese biônica ALX.

Deseja-se, a partir deste estudo, preencher a lacuna de informações referentes à resistência mecânica de componentes impressos com menores taxas de preenchimento, o que comumente ocorre em aplicações industriais reais. Desta forma, a importância deste trabalho reside no fato de que abordar componentes com preenchimento completo é uma estratégia pouco utilizada na prática. Tal fato está relacionado com a tentativa de reduzir o peso do objeto e os custos com matéria-prima.

## 1.2 **Metodologia de Pesquisa**

O presente estudo parte de uma revisão bibliográfica acerca da caracterização dos principais materiais termoplásticos empregados no processo de impressão 3D por extrusão

de material. Em seguida, testes experimentais são realizados em componentes impressos por essa tecnologia, visando obter maiores informações a respeito de suas propriedades mecânicas. Dessa forma, ensaios de tração são efetuados em corpos de testes com o objetivo de mensurar a resistência à tração de tais modelos. Por fim, uma análise inicial é efetuada no dispositivo protético com o auxílio de dois dinamômetros eletrônicos, palmar e portátil, tendo em vista aferir a força de preensão palmar e a força de tração exercida pelo motor na flexão dos dedos.

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizado o método proposto por [Bailey et al. \(2007\)](#) e [Viana, Formoso e Kalsaas \(2012\)](#) para o mapeamento de pesquisas. A ferramenta empregada consistiu em uma revisão sistemática da literatura que conjectura uma estrutura para a busca sistêmica de periódicos, extração de dados e análise destes ([BAILEY et al., 2007](#)). A revisão sistemática da literatura, também chamado *mapping study*, permitiu sintetizar e avaliar a consistência dos estudos existentes sobre determinado assunto, fornecendo uma ampla visão sobre a pesquisa primária, bem como otimizar a busca e seleção de trabalhos, além da avaliação de sua qualidade, por intermédio de um método explícito e reproduzível ([VIANA; FORMOSO; KALSAAS, 2012](#)).

O mapeamento realizado considerou o uso de livros, normas técnicas de padronização e a pesquisa em bases de dados que contém uma vasta quantidade de publicações e ferramentas de buscas eficazes, que permitiram o uso de expressões lógicas para a seleção dos artigos a partir da escolha de expressões-chave.

As bases de dados selecionadas foram: *Scopus*, *Science Direct* e Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Embora existam outras bases, a pesquisa limitou-se a estas, visto que elas já são capazes de contemplar um número significativo de periódicos e com importantes publicações. A busca nas bases restringiu-se à artigos de periódicos, em língua inglesa, cujas expressões-lógicas estavam presentes no título, no resumo ou nas palavras-chave.

### 1.3 Estrutura da Dissertação

O presente trabalho está estruturado em capítulos, em que o primeiro traz uma introdução, realizando uma primeira abordagem ao universo da impressão 3D, apontando as principais vantagens e desvantagens dessa técnica de manufatura, bem como os objetivos e motivação que levaram a realização desta pesquisa. Nos demais capítulos tem-se:

- Capítulo 2: os conceitos envolvendo a tecnologia de impressão por extrusão de material, apresentando as etapas mais relevantes desse processo. Nesse capítulo também são expostos: as propriedades gerais dos materiais termoplásticos utilizados na impressão 3D por extrusão de material; a contribuição da manufatura aditiva na confec-

ção de próteses de mão e a prótese de mão ALX, desenvolvida no LaMoP3D da Universidade Federal de Goiás;

- Capítulo 3: uma revisão da literatura sobre a caracterização de materiais termoplásticos ABS e PLA, comumente empregados na extrusão de material, apresentando as principais contribuições presentes no estado-da-arte;
- Capítulo 4: os materiais e métodos empregados na caracterização dos materiais termoplásticos ABS e PLA;
- Capítulo 5: a análise estatística e comparativa dos resultados obtidos por meio dos testes experimentais realizados e, a construção de modelos analíticos simplificados para a predição da tensão última média dos componentes impressos com as configurações estudadas;
- Capítulo 6: a análise funcional do protótipo da prótese de mão abordada no Capítulo 3, através de experimentação;
- Capítulo 7: conclusões a partir da realização do estudo, assim como apontamentos de futuras melhorias no projeto da prótese de mão.



## Capítulo 2

---

# Tecnologia de Impressão por Extrusão de Material

---

O conceito de impressão 3D teve início em 1984, com a criação da primeira máquina de prototipagem rápida desenvolvida por Charles Hull. O protótipo desenvolvido por Hull, foi nomeado por ele, de estereolitografia (*Stereolithography* - SLA) e realizava a confecção de objetos tridimensionais, a partir da solidificação de uma resina líquida fotossensível por intermédio de um laser ultravioleta. Para comercializar sua criação, em 1986, Hull fundou a 3D Systems Company (HULL, 2015; GROTH *et al.*, 2014).

Em 1988, Scott Crump, inventou uma nova forma de impressão de objetos tridimensionais, a Modelagem por Deposição de Material Fundido (*Fused Deposition Modeling* - FDM). A impressão por FDM realiza a confecção de objetos 3D, camada a camada, a partir da extrusão de materiais termoplásticos. Tal criação foi comercializada em 1990 pela Stratasys, empresa fundada por Crump e sua esposa (GROTH *et al.*, 2014).

A tecnologia desenvolvida por Hull tem servido como base, nas últimas três décadas, para a criação de novos processos de impressão 3D (SILVA *et al.*, 2015). Apesar deste método de fabricação estar associado a formas de impressão, materiais específicos, precisão, velocidades de impressão e custos, diferenciados, todas as técnicas compartilham do mesmo conceito, a confecção camada a camada de um objeto tridimensional (LUNSFORD *et al.*, 2016).

A Tabela 2.1 exhibe a variedade de métodos de impressão 3D já desenvolvidos e dentre as principais empresas que comercializam tais tecnologias destacam-se a Zcorp, Objet Geometries, Dimension, Designcraft, Stratasys e 3D Systems (BERMAN, 2012; GROTH *et al.*, 2014).

Tabela 2.1 – Principais tipos de processos de impressão 3D.

<b>Tipo de Manufatura</b>	<b>Descrição</b>
<i>Binder Jetting</i>	Um agente de ligação líquido é depositado seletivamente e imediatamente curado para unir partículas de pó.
<i>Directed Energy Deposition</i>	Um laser ou feixe de elétrons é usado para fundir o material depositado por um bocal sobre um leito de impressão.
<i>Material Extrusion (ME)</i>	O material é parcialmente fundido e dispensado seletivamente e sob fluxo contínuo através de um bocal ou orifício, como exemplo tem-se a FDM ( <i>Fused Deposition Modeling</i> ).
<i>Material Jetting</i>	Gotas de fotopolímero líquido ativadas pela luz, são seletivamente depositadas e solidificadas por luz ultravioleta instantaneamente, como exemplo tem-se a PolyJet.
<i>Powder Bed Fusion</i>	Um laser ou feixe de elétrons funde seletivamente regiões de um leito em pó, como exemplo tem-se a SLS ( <i>Selective Laser Sintering</i> ) e a DMLS ( <i>Direct Metal Laser Sintering</i> ).
<i>Sheet Lamination</i>	Folhas de materiais são recortados e unidas através de soldagem ultrassônica para formar um objeto.
<i>Vat Photopolymerization</i>	Utiliza uma cuba de resina de fotopolímero líquido solidificada por uma luz ultravioleta, como exemplo a SLA ( <i>Stereolithography</i> ).

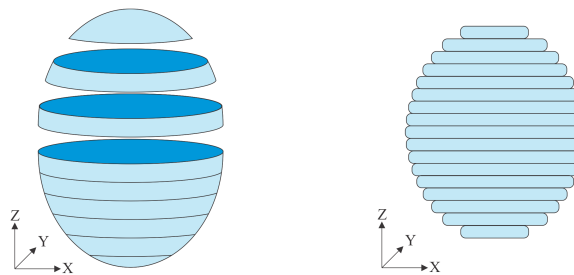
Fonte: Adaptado de [ASTM:F2792-12a \(2012\)](#).

Embora, outros fabricantes utilizem o processo idêntico para a confecção de objetos tridimensionais, os termos FDM e SLA são usados especificamente para máquinas comercializadas pela Stratasys e 3D Systems, respectivamente, conforme rege a norma [ASTM:F2792-12a \(2012\)](#).

Para efetuar a construção do objeto 3D, a tecnologia de impressão por extrusão de material (ME), necessita de dados tridimensionais de um projeto assistido por computador (*Computer Aided Design-CAD*). Através do CAD, projetos e desenhos técnicos podem ser elaborados, contribuindo assim para o desenvolvimento de peças e estruturas diversas com geometria complexa e refinada (AHN *et al.*, 2002; BURN; TA; GOGOLA, 2016; VOLPATO; FOGGIATTO; SCHWARZ, 2014; CHRISTIYAN; CHANDRASEKHAR; VENKATESWARLU, 2016).

Os dados CAD do modelo a ser confeccionado, são então convertidos em arquivos *StereoLithography* (.STL), os quais serão posteriormente abertos em um programa específico que realizará a tradução do desenho tridimensional em bidimensional, seccionando o objeto em camadas individuais no plano  $xy$  (Figura 2.1). Estes programas são comumente chamados de "*slicers*" ou "*slicing*", ou seja, fatiadores (AHN *et al.*, 2002; BURN; TA; GOGOLA, 2016; VOLPATO; FOGGIATTO; SCHWARZ, 2014; CHRISTIYAN; CHANDRASEKHAR; VENKATESWARLU, 2016).

Figura 2.1 – Objeto fatiado.



Fonte: A autora.

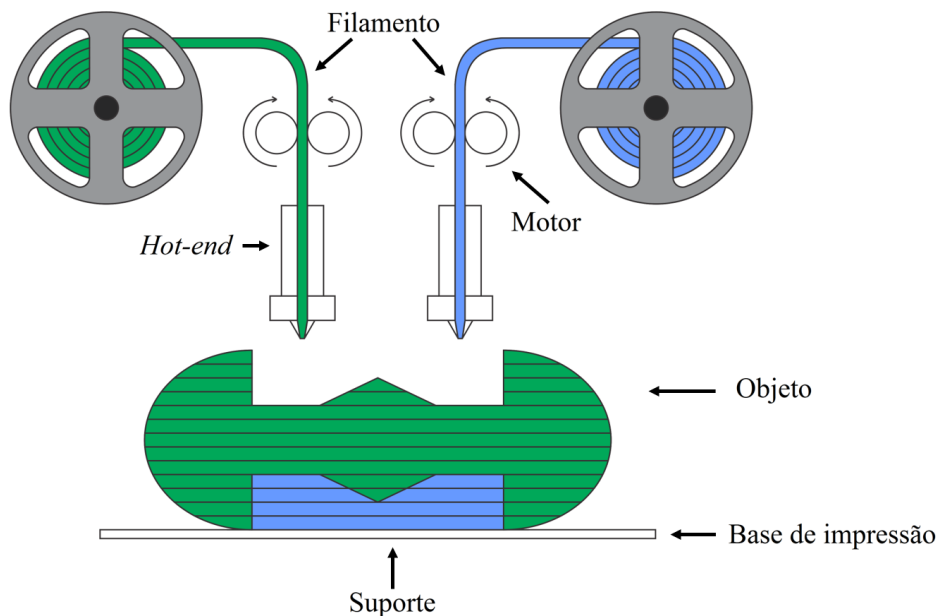
Além de seccionar o modelo, tais programas também definem um conjunto de instruções computacionais, em relação aos três eixos de referência, que estabelece a rota a ser seguida pelo bocal de impressão e a construção de suportes para o objeto, quando esse possui partes protuberantes, em que não haverá camadas anteriores capazes de fornecer sustentação às demais. Todas estas informações são armazenadas como Gcode, que consiste em um tipo de arquivo reconhecido pelas impressoras 3D, e é transmitido diretamente via USB ou outro dispositivo de memória, tal como um cartão ou pendrive (AHN *et al.*, 2002; BURN; TA; GOGOLA, 2016; VOLPATO; FOGGIATTO; SCHWARZ, 2014; CHRISTIYAN; CHANDRASEKHAR; VENKATESWARLU, 2016).

Após a definição dos parâmetros de impressão, inicia-se o aquecimento da base de impressão até a temperatura indicada, o bocal é calibrado e também aquecido. Quando ambos, bocal e base de impressão, atingem a temperatura informada, o processo de impressão é iniciado. A ponta extrusora então percorrerá sucessivamente o caminho determinado pelo Gcode para a impressão das camadas, até a construção completa do objeto. Finalmente, o suporte formado poderá ser removido manualmente ou por intermédio de ferramentas ou em certos casos, com o auxílio de uma solução aquosa (AHN *et al.*, 2002; BURN; TA; GO-

GOLA, 2016; VOLPATO; FOGGIATTO; SCHWARZ, 2014; CHRISTIYAN; CHANDRASEKHAR; VENKATESWARLU, 2016).

No caso da técnica de impressão ME, o material a ser impresso, a princípio, se encontra na forma de filamento enrolado em carretel. A base de impressão situa-se no plano  $xy$ , que receberá as camadas depositadas. Um bico extrusor, responsável por efetuar a impressão, fundirá o filamento e o extrudará numa fina camada sobre a camada modelo previamente construída sob a base de impressão, conforme exhibe a Figura 2.2. O material depositado se liga à camada adjacente, arrefece e solidifica. Após a deposição de toda uma camada, a plataforma move-se ao longo do eixo  $z$  por um incremento equivalente à espessura determinada, e a camada subsequente é imediatamente depositada sobre ela (ONWUBOLU; RAYEGANI, 2014).

Figura 2.2 – Processo de impressão por extrusão de material.



Fonte: A autora.

É preciso conhecer e definir diversos parâmetros no momento da impressão (LEE; ABDULLAH; KHAN, 2005; BURN; TA; GOGOLA, 2016), alguns deles são:

- Altura da Camada:** determina a espessura da seção transversal de cada camada. Quanto menor o valor desta variável, mais fino e suave é a superfície do objeto impresso, porém maior será o tempo necessário para finalizar a peça;
- Preenchimento:** estabelece a densidade interior do objeto. Objetos confeccionados em impressoras 3D, na maioria dos casos, não são 100% sólidos. A peça é preenchida apenas com porcentagem necessária de material de modo a garantir a sua rigidez;

- c) **Temperatura da base de impressão e do bico extrusor:** dependente do tipo de material usado, é recomendada pelos fabricantes de cada filamento. A escolha da temperatura adequada é de extrema importância, visto que ela controla a viscosidade do material extrudado. Uma temperatura não ideal fará com o que o material não flua conforme o esperado;
- d) **Orientação da impressão:** Define o ângulo de impressão da peça em relação à base;
- e) **Cor do filamento:** o material pode ter disponibilidade de variadas cores, transparente, branco, azul, verde, cinza, amarelo, dentre outros.

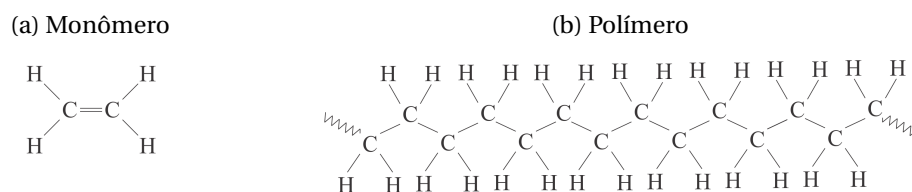
O comportamento mecânico do objeto construído depende diretamente da escolha dos parâmetros de impressão, e por isso o usuário deve ter grande conhecimento destes, pois eles afetam as propriedades mecânicas da peça. Diante da complexidade do processo de impressão por extrusão de material, determinar uma relação eficiente entre os parâmetros de processo e as propriedades da peça fabricada é uma tarefa desafiadora (LEE; ABDULLAH; KHAN, 2005; ONWUBOLU; RAYEGANI, 2014).

## 2.1 Propriedades Gerais dos Termoplásticos Empregados na Extrusão de Material

### 2.1.1 Conceitos Fundamentais

O termo polímero é originário do grego *poli* (muitos) e *meros* (unidade de repetição). Os polímeros são constituídos de macromoléculas compostas por inúmeras unidades químicas iguais, repetidas regularmente ao longo da cadeia. Tais unidades químicas, chamadas meros, são ligadas entre si por covalência (CANEVAROLO Jr., 2002; BIASOTO; MENDES, 1999; PAOLI, 2009). A quantidade de meros existentes na cadeia polimérica determina o grau de polimerização (GP), comumente simbolizado por  $n$  (BIASOTO; MENDES, 1999).

Figura 2.3 – Exemplificação Básica da Formação de um Polímero.



Fonte: (CARVALHO, 2007).

A reação química que leva a formação de um polímero, é denominada polimerização. Os compostos químicos suscetíveis a esse tipo de reação são chamados monômeros.



## 2.1.2 Classificação dos polímeros

O avanço científico tem contribuído significativamente para o desenvolvimento de uma crescente gama de polímeros visando atender às mais diversas aplicações. Com isso uma ampla variedade de classificações emergiu tendo em vista melhor especificar características essenciais dos polímeros. Embora haja diferentes classificações, nesta seção serão retratadas apenas duas: quanto ao seu comportamento mecânico e quanto ao seu desempenho mecânico, visto que estas se aderem melhor ao objetivo do estudo enquanto que as demais estão fora do escopo deste trabalho (CANEVAROLO Jr., 2002).

### 2.1.2.1 Quanto ao comportamento mecânico

Quanto ao comportamento mecânico, serão consideradas apenas as classes referentes aos materiais plásticos. Tais materiais podem ser divididos em termoplásticos, termofixos e baroplásticos.

Termoplásticos são plásticos que são rígidos quando frios mas, quando submetidos a um aumento considerável da temperatura e leve aumento da pressão, amolecem e fluem, podendo ser moldados. Ao serem novamente resfriados solidificam-se assumindo a forma do molde. São materiais considerados recicláveis, visto que novas solicitações de temperatura e pressão reiniciam o processo (CANEVAROLO Jr., 2002).

Termofixos são plásticos que ao serem submetidos a um aumento considerável da temperatura e leve aumento da pressão, amolecem e fluem, podendo ser moldados. Nessa fase, o material reage quimicamente e se solidifica. Novos aumentos de temperatura e pressão não conseguem mais influenciar o comportamento do material após a cura, dessa forma, estes plásticos são considerados não recicláveis, pois apenas podem ser moldados somente na forma de pré-polímero (CANEVAROLO Jr., 2002).

Baroplásticos são plásticos que com um leve aumento da temperatura e um significativo aumento da pressão, apresenta comportamento borrachoso (CANEVAROLO Jr., 2002).

### 2.1.2.2 Quanto ao desempenho mecânico

Esta classificação é realizada com base no desempenho mecânico exibido pelos polímeros termoplásticos quando usados na confecção de um item. Neste critério, há as seguintes classes:

- Termoplásticos convencionais: Esta classe representa 90% da produção total de polímeros do mundo. Consistem em plásticos de baixo custo, fácil processamento e de alta produção porém com baixo nível de exigência mecânica (CANEVAROLO Jr., 2002). São exemplos: o poliestireno e o policloreto de vinila.

- Termoplásticos especiais: são polímeros levemente mais caros que os convencionais, porém com algumas propriedades marginalmente melhores, tais como transparência, estabilidade térmica e química (CANEVAROLO Jr., 2002). São exemplos: o estireno-acrilonitrila e o politetrafluoro-etileno.
- Termoplásticos de engenharia: são polímeros capazes de apresentar alta resistência mecânica, boa tenacidade e estabilidade dimensional. Usualmente empregados para fabricação de dispositivos mecânicos (CANEVAROLO Jr., 2002). São exemplos: o acrilonitrila-butadieno-estireno, as poliamidas (*nylon* em geral) e o politereftalato de etileno.
- Termoplásticos de engenharia especiais: são polímeros, que contém em sua cadeia principal, uma significativa quantidade de anéis aromáticos, o que contribui para aumentar a estabilidade térmica (suportando temperaturas superiores a 150 °C) para uso em aplicações que exigem principalmente altas temperaturas (CANEVAROLO Jr., 2002). São exemplos os polímeros de cristal líquido polimérico, polieter-eter-cetona e polímeros contendo enxofre.

## 2.2 Materiais Polímeros Usados na Tecnologia de Impressão por Extrusão de Material

Diversos polímeros podem ser empregados na tecnologia de impressão por extrusão de material, tais como nylon, PLA, ABS, PET-G, polietileno de alta densidade, ASA (acrilonitrila estireno acrílico), policarbonato, ULTEM dentre outros (STRATASYS, 2017; DAWOUD; TAHA; EBEID, 2016; 3DPRINTINGFROMSCRATCH, 2017). Contudo, os materiais mais comumente empregados no processo de impressão ME corresponde aos polímeros ABS e PLA (TYMRAK; KREIGER; PEARCE, 2014).

### 2.2.0.3 Obtenção do Polímero ABS

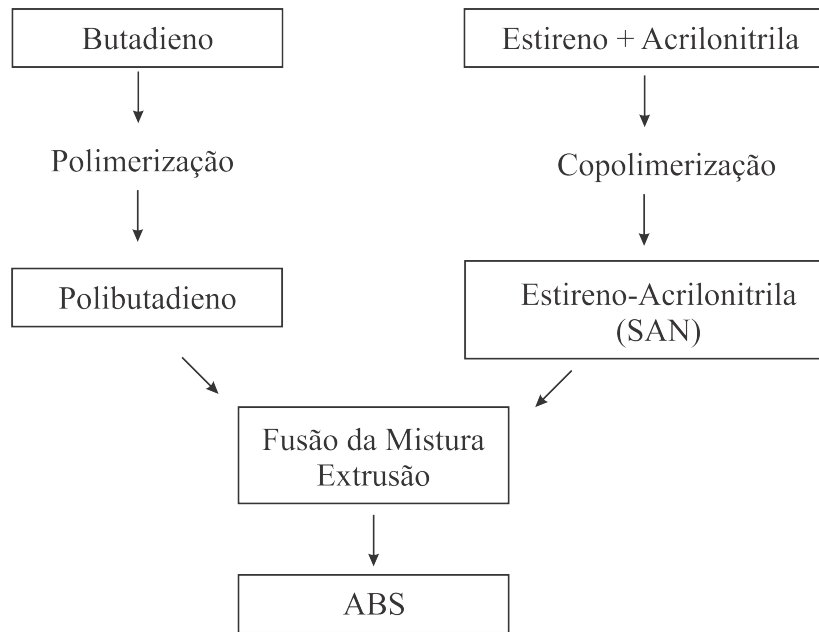
O ABS está entre os principais copolímeros envolvendo o estireno (CANEVAROLO Jr., 2002). Tal material possui características como alta resistência mecânica, bom aspecto superficial, fácil mobilidade e média resistência à temperatura (HARADA; WIEBECK, 2005).

O polímero ABS é obtido através da copolimerização entre os monômeros acrilonitrila, butadieno e estireno. A fabricação do ABS inicia-se com a produção do copolímero de estireno-acrilonitrila (SAN), que pode ser produzido por intermédio das técnicas de polimerização por suspensão (heterogênea) ou solução (homogênea) (HARADA; WIEBECK, 2005).

O SAN é comumente empregado na fabricação de utensílios domésticos, partes internas de refrigeradores e automobilísticas, dentre outros (HARADA; WIEBECK, 2005).

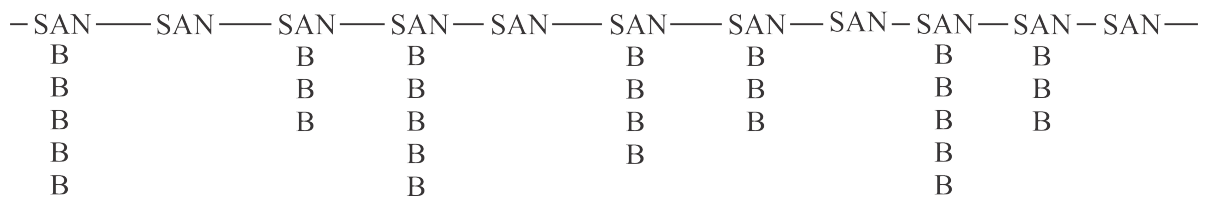
Após o processo de obtenção do ABS, é efetuada a fusão do SAN com o polibutadieno obtendo, dessa forma, o ABS (Figura 2.4). Tal processo constitui-se em uma polimerização por enxerto, representado na Figura 2.5.

Figura 2.4 – Resumo do Processo de Obtenção do ABS.



Fonte: (HARADA; WIEBECK, 2005).

Figura 2.5 – Representação Gráfica da Estrutura Química do Copolímero ABS.



Fonte: (HARADA; WIEBECK, 2005).

As propriedades do ABS variam de acordo com as concentrações dos monômeros que compõem a mistura. Altos níveis de acrilonitrila propiciam resistência química e térmica, de estireno proporciona mobilidade, rigidez e brilho enquanto que de butadieno fornece resistência ao impacto e capacidade de alongamento. O ABS comum, possui em média 20% de butadieno, 25% de acrilonitrila e 55% de estireno, podendo ser combinado com outros polímeros afim de melhorar certas características desejáveis (alguns exemplos são apresentados na Tabela 2.3) (HARADA; WIEBECK, 2005).

Tabela 2.3 – Propriedades Aperfeiçoadas com a Copolimerização do ABS.

Combinação	Propriedade Modificada
ABS/ Policloreto de Vinila (PVC)	*auxilia no processamento e modificadora de impacto **resistência ao calor e ao impacto ***auxilia no processamento
ABS/ Policarboneto (PC)	Facilidade de processamento Resistência ao calor Resistência ao impacto
ABS/ Poliamida (PA)	Resistência ao impacto, inclusive à baixas temperaturas Alta qualidade superficial Fácil processamento Resistência química Resistência ao calor Atrativa propriedade acústica

\*ABS com baixo módulo de elasticidade, \*\*ABS com médio módulo de elasticidade, \*\*\*ABS com alto módulo de elasticidade.

O ABS possui módulo de elasticidade na faixa de temperatura de  $-40^{\circ}\text{C}$  até  $+150^{\circ}\text{C}$ , além de exibir boa resistência à tração, ao impacto e dureza. A resistência à tração no escoamento varia de 31 a 55 *MPa*. Ademais, dependendo das condições de processo, o ABS pode ser submetido a temperaturas permanentes de uso de até  $80^{\circ}\text{C}$  sem que haja deformações excessivas (HARADA; WIEBECK, 2005).

O ABS normalmente apresenta resistência à água, à soluções salinas, às soluções alcalinas, aos ácidos orgânicos ou ácidos minerais diluídos. Possui baixa resistência diante de hidrocarbonetos aromáticos, acetonas, éteres, ésteres, hidrocarbonetos clorados e ácidos minerais ou orgânicos com alta concentração. Além disso, o ABS apresenta facilidade para queima, ou seja, é inflamável (HARADA; WIEBECK, 2005).

Por ser capaz de oferecer boas características como não manchar, ter boa aparência, alto brilho, resistência química e baixa densidade, o ABS exibe grande potencial em aplicações. Em virtude das várias propriedades oferecidas por esse polímero, ele é comumente aplicado na fabricação de peças submetidas a grandes esforços mecânicos, como na indústria automobilística, na fabricação de eletrodomésticos, tubulação de transporte de fluidos (podendo ser utilizados até  $100^{\circ}\text{C}$ ). Por oferecer características anti-ressonantes também pode ser empregado na fabricação de gabinetes para rádios, televisores e similares (HARADA; WIEBECK, 2005).

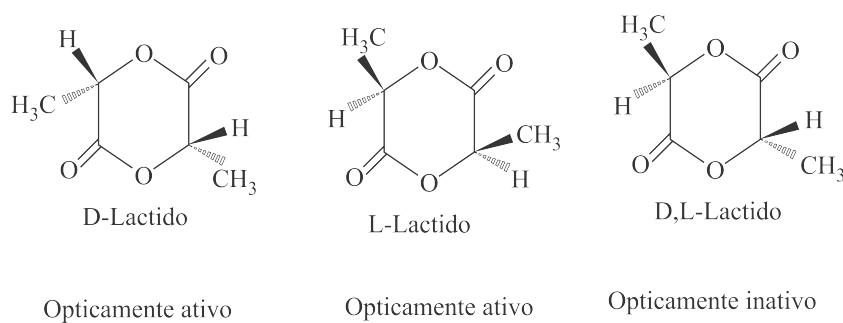
### 2.2.0.4 Obtenção do Polímero PLA

O PLA é um poliéster termoplástico alifático linear, compostável e derivado de recursos renováveis (CARRASCO *et al.*, 2010; DRUMRIGHT; GRUBER; HENTON, 2000; LIM; AURAS; RUBINO, 2008; MURARIU; DUBOIS, 2016; DATTA; HENRY, 2006; GU *et al.*, 2008). É um polímero versátil, biodegradável e consiste em uma alternativa sustentável aos polímeros convencionais de origem petroquímica, tais como o polietileno (PE), polipropileno (PP), polietileno tereftalato (PET) e poliestireno (PS) (CARRASCO *et al.*, 2010; DRUMRIGHT; GRUBER; HENTON, 2000; NAMPOOTHIRI; NAIR; JOHN, 2010; AURAS; HARTE; SELKE, 2004).

Inicialmente, em virtude de seu custo elevado, baixa disponibilidade e peso molecular limitado, o PLA foi majoritariamente empregado na área médica. Esse material era usado na confecção de dispositivos de implante, *scaffolds* de tecido e suturas internas em função de suas características de biocompatibilidade e bioabsorbilidade (LIM; AURAS; RUBINO, 2008).

A produção do biopolímero PLA abrange desde o processamento até a polimerização de monômeros a partir do ácido láctico. O ácido láctico é uma molécula quiral (consiste em uma molécula que não pode ser sobreposta à sua imagem espelhada) e exibe um par de enantiômeros (imagens especulares) conhecidos como *D* e *L*-lático, que podem assumir 3 formas: *D*-lactido puro, o *L*-lactido puro e o meso-lactido (Figura 2.6) (NAMPOOTHIRI; NAIR; JOHN, 2010).

Figura 2.6 – Formas Enantioméricas do PLA.



Fonte: (NAMPOOTHIRI; NAIR; JOHN, 2010).

Os enantiômeros do ácido láctico, *D* e *L*, divergem entre si pelo efeito sob luz polarizada. O estereoisômero *L* é levogiro, visto que desvia a luz polarizada para a esquerda, enquanto que, o estereoisômero *D* é dextrogiro, pois desvia a luz polarizada para a direita. Quando os estereoisômeros *L* e *D* estão em quantidades iguais (mistura racêmica), a mistura não reflete nenhum feixe de luz sendo opticamente inativa (GUPTA; REVAGADE; HILBORN, 2007; LUNT; SHAFER, 2000; SAWYER, 2003; VINK *et al.*, 2003; DATTA; HENRY, 2006; LUNT, 1998).

O ácido láctico pode ser derivado de recursos petroquímicos bem como de recursos naturais. O ácido láctico produzido quimicamente é obtido principalmente pela hidrólise de lactonitrilo por ácidos fortes, a qual fornece uma mistura racêmica de enantiômeros *D*

e *L*-lático, isto é, 50% estereoisômeros *D* e 50% de estereoisômeros *L* (RASAL; JANORKAR; HIRT, 2010; NAMPOOTHIRI; NAIR; JOHN, 2010).

O método natural de obtenção do PLA é por intermédio da fermentação bacteriana. A via de produção por fermentação oferece vantagens como baixo custo com substrato, menor consumo de energia e temperaturas de produção mais baixas, além de permitir a obtenção de produto com elevados níveis de isômeros levogiros (reflete a luz para a esquerda), que proporcionam principalmente maior cristalinidade ao PLA. O ácido lático produzido via fermentação microbiana, é tipicamente composto por 99.5% de estereoisômeros *L* e apenas 0.5% de estereoisômeros *D* (VINK *et al.*, 2003; VINK *et al.*, 2004; RASAL; JANORKAR; HIRT, 2010; GUPTA; REVAGADE; HILBORN, 2007).

A polimerização do ácido lático pode ser dada a partir de diversos processos, tais como: policondensação, polimerização por abertura de anel, desidratação azeotópica e polimerização enzimática (AURAS; HARTE; SELKE, 2004; GARLOTTA, 2001). Contudo, a produção atual é predominantemente dada por meio da polimerização por condensação direta do ácido lático e a polimerização por abertura de anel do lactido (LASPRILLA *et al.*, 2012).

O primeiro método provê a produção de polímero de peso molecular limitado (de baixo à intermediário) em razão do processo não permitir a remoção total de água e impurezas. Tal procedimento consiste na remoção de água do ácido lático por técnicas de condensação com uso de solventes, a vácuo e a temperaturas elevadas (VINK *et al.*, 2003).

O segundo método, o qual é usado pela NatureWorks® (atual líder de produção do PLA), se baseia na polimerização por abertura de anel de lactido em três etapas: na primeira, um pré-polímero de baixo peso molecular é obtido a partir da remoção de água do ácido lático, sem a adição de solventes; a segunda etapa envolve a despolimerização catalítica do produto resultante na etapa anterior, a fim de obter um dímero cíclico intermediário, chamado lactido, sendo em seguida purificado por processos de destilação. Finalmente, o lactido purificado é então polimerizado por meio da abertura de anel, sem o emprego de solventes, resultando no polímero PLA na forma granulada (AURAS; HARTE; SELKE, 2004; VINK *et al.*, 2003).

As propriedades finais do ácido polilático, tais como cristalinidade, ponto de fusão, solubilidade entre outras, são fortemente influenciadas pela proporção de enantiômeros *L* e *D* no polímero, conforme pode ser verificado na Tabela 2.4 (CARRASCO *et al.*, 2010; RASAL; JANORKAR; HIRT, 2010; AURAS; HARTE; SELKE, 2004).

Polímeros com maiores níveis de enantiômero *L* ( $D < 2\%$ ) são mais cristalinos à medida que polímeros com maiores taxas de *D* são mais amorfos, basicamente, níveis superiores a 15% de incorporação de meso-lactido (ou *D*-lactido), fazem com que o polímero não seja mais passível de cristalização (DRUMRIGHT; GRUBER; HENTON, 2000; LIM; AURAS;

RUBINO, 2008; LUNT, 1998; VINK *et al.*, 2003; GUPTA; REVAGADE; HILBORN, 2007).

Tabela 2.4 – Propriedades Físicas do PLA Copolimerizado.

Razão dos Copolímeros	Temperatura de Transição Vítreia (°C)	Temperatura de Fusão (°C)
100/0 (L/D,L)-PLA	63	178
95/5 (L/D,L)-PLA	59	164
90/10 (L/D,L)-PLA	56	150
85/15 (L/D,L)-PLA	56	140
80/20 (L/D,L)-PLA	56	125

Fonte: (LIM; AURAS; RUBINO, 2008).

Por intermédio da Tabela 2.5 é possível verificar a influência da cristalinidade nas propriedades mecânicas do PLA. A Tabela 2.5 expõe um comparativo das propriedades mecânicas de um polímero com alto teor de estereoisômero *L* e um polímero originado de uma mistura racêmica.

Tabela 2.5 – Efeito da Cristalinidade nas Propriedades Mecânicas do PLA.

	L-PLA	D,L-PLA
Resistência à Tração (MPa)	59	44
Alongamento até Ruptura (%)	7.0	5.4
Módulo de Elasticidade (MPa)	3750	3900
Resistência ao Escoamento (MPa)	70	53
Resistência à Flexão (MPa)	106	88
Impacto Unnotched Izod (J/m)	195	150
Impacto notched Izod (J/m)	26	18
Dureza	88	76
Temperatura de Deflexão Térmica (°C)	55	50
Penetração Vicat (°C)	59	52

Fonte: Adaptado de Garlotta (2001).

O PLA de peso molecular elevado constitui-se em um termoplástico, incolor e com brilho, exibindo propriedades semelhantes ao PS e ao PET (GARLOTTA, 2001; DORGAN; LEHERMEIER; MANG, 2000; CARRASCO *et al.*, 2010). A Tabela 2.6 apresenta um comparativo das propriedades intrínsecas destes polímeros.

Diversas propriedades interessantes são exibidas pelo PLA, como a sua boa processabilidade, biocompatibilidade, biodegradabilidade e baixo impacto ambiental (CARRASCO *et al.*, 2010; GUPTA; KUMAR, 2007; LASPRILLA *et al.*, 2012). Tais características, tornam esse material um forte candidato em aplicações como plásticos commodities, produtos agrícolas, materiais descartáveis, indústria têxtil e medicina (GUPTA; REVAGADE; HILBORN, 2007; LASPRILLA *et al.*, 2012).

Tabela 2.6 – Resumo comparativo das propriedades do PLA, PS e PET.

	PLA	PS	PET
Densidade Relativa	1.24	1.04-1.06	1.37
Claridade	Transparente	Transparente	Transparente
<b>Propriedades Mecânicas</b>			
Resistência à tensão de tração (MPa)	48-110	34-96	47
Módulo de Tensão (GPa)	3.5-3.8	2.9-3.5	3.1
Alongamento de tração (%)	2.5-100	3-4	50-300
Impacto Notched Izod, 23°C )J/m)	13		79
<b>Propriedades Térmicas</b>			
Temperatura de Transição Vítreia (°C)	60	95	75
Temperatura de Fusão (°C)	153		250
Temperatura de Amolecimento (°C)	55-60	84-106	74-200
Temperatura de Processamento (°C)	210	230	255

Fonte: (CARRASCO *et al.*, 2010).

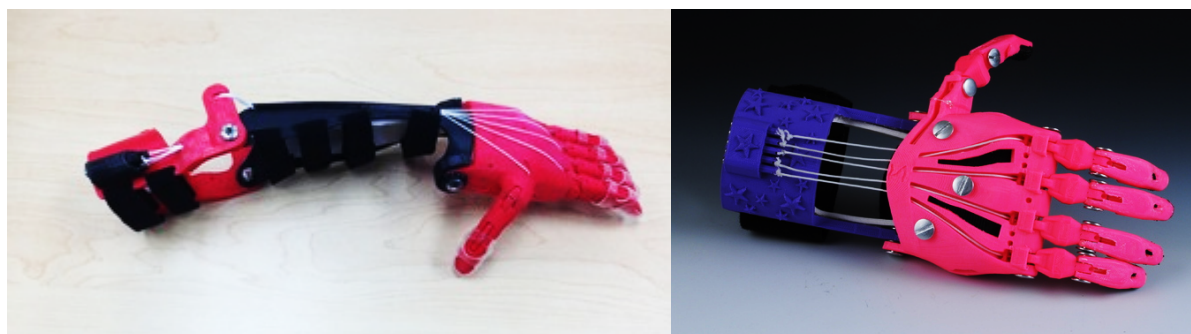
## 2.3 Contribuição da Manufatura Aditiva na Confeção de Próteses de Mão

Nos últimos 5 anos, a impressão 3D tem recebido grande aceitação na área médica, mais especificamente na medicina de reabilitação, ampliando-se as aplicações de próteses e órteses fabricadas por manufatura aditiva a uma fração do custo das próteses convencionais (SILVA *et al.*, 2015). Um dos fatores que contribuiu para esta expansão da impressão 3D na área médica, foi a disponibilidade de projetos de próteses, órteses, cintas e talas, entre outros modelos, de código aberto (Figura 2.7), servindo como um repositório de projetos 3D imprimíveis, conforme apresentado por Burn, Ta e Gogola (2016) (Tabela 2.7).

Figura 2.7 – Exemplo de prótese de mão confeccionada por impressão 3D.

(a)

(b)



Fonte: [enablingthefuture.org](http://enablingthefuture.org) (2017)

Tabela 2.7 – Exemplos de próteses de mão de livre compartilhamento.

Nome	Website (.STL, Arquivos e Instruções de Montagem)
Robohand	<a href="http://www.robohand.net/faq">http://www.robohand.net/faq</a>
Raptor Hand	<a href="http://enablingthefuture.org/upper-limb-prosthetics/the-raptor-hand/">http://enablingthefuture.org/upper-limb-prosthetics/the-raptor-hand/</a>
Raptor Reloaded	<a href="http://enablingthefuture.org/upper-limb-prosthetics/raptor-reloaded/">http://enablingthefuture.org/upper-limb-prosthetics/raptor-reloaded/</a>
Flexy Hand 2	<a href="http://enablingthefuture.org/upper-limb-prosthetics/the-flexy-hand/">http://enablingthefuture.org/upper-limb-prosthetics/the-flexy-hand/</a>
Odysseus Hand	<a href="http://enablingthefuture.org/upper-limb-prosthetics/odysseus-hand/">http://enablingthefuture.org/upper-limb-prosthetics/odysseus-hand/</a>
Cyborg Beast	<a href="http://3dprint.nih.gov/discover/3dpx-000524">http://3dprint.nih.gov/discover/3dpx-000524</a>
Talon Hand 2.X	<a href="http://3dprint.nih.gov/discover/3dpx-000992">http://3dprint.nih.gov/discover/3dpx-000992</a>
K-1 Hand	<a href="http://3dprint.nih.gov/discover/3dpx-001705">http://3dprint.nih.gov/discover/3dpx-001705</a>

Fonte: Adaptado de Burn, Ta e Gogola (2016).

Estas próteses não são de alta tecnologia como as disponíveis comercialmente por empresas como a Ottobock e a TouchBionics. Contudo para pessoas de menor poder aquisitivo, uma prótese impressa e funcional representa uma mudança de vida significativa, permitindo a realização de atividades diárias como higiene, apreensões de objetos, vestir e aparência (LUNSFORD *et al.*, 2016).

Há sites como a [enablingthefuture.org](http://enablingthefuture.org) (E-Nable), que possuem fóruns para a comunidade discutir inovações e aprender sobre os protótipos de forma a contribuir cada vez mais para a qualidade dos projetos (SILVA *et al.*, 2015). A facilidade de acesso eletrônico e sem custos, aos protótipos e informações sobre impressão 3D potencializa um grande impacto no setor de próteses e órteses no futuro (BURN; TA; GOGOLA, 2016; SILVA *et al.*, 2015).

Melhorar o acesso aos cuidados protéticos, a funcionalidade dos dispositivos bem como as informações estruturais das próteses é uma necessidade substancial e de nível global. Por isso, a utilização da impressão 3D para a fabricação de próteses consiste em uma alternativa para a produção de baixo custo destes dispositivos, oferecendo ainda grande capacidade de personalização e funcionalidade, de modo a fornecer próteses que atendam a necessidades específicas de cada usuário (SILVA *et al.*, 2015). Logo, a utilização da impressão 3D na produção de mecanismos protéticos representa uma solução viável e acessível.

Estudos expõem ainda a insatisfação de muitos amputados de membros superiores com os mecanismos protéticos tradicionais (SILVA *et al.*, 2015; WRIGHT; HAGEN; WOOD, 1995), servindo de motivação para o uso desta nova tecnologia na produção de próteses customizáveis e com maiores funcionalidades.

Os altos índices de rejeição e abandono das próteses de membros superiores estão relacionados ao design ultrapassado, funcionalidade limitada dos dispositivos, altos custos com reparos, ajustes e acessórios, tipo de prótese, ajuste insuficiente, desconforto, falhas mecânicas, falta de naturalidade, má compreensão da prótese, falta de sensibilidade tátil (WRIGHT; HAGEN; WOOD, 1995; DAKPA; HEGER, 1997). Fatores psicológicos e psicossoci-

ais relacionados à rejeição compreendem altas expectativas em relação as funções da prótese, baixa aceitação de outras pessoas, primeiras experiências negativas com relação ao dispositivo, baixa autoestima, entre outros (RESNIK *et al.*, 2012). Contudo, a maioria das pessoas com perda do membro superior, que rejeitaram a utilização da prótese, mostraram-se dispostas a reconsiderar o uso do dispositivo desde que melhorias fossem realizadas à um custo acessível (RESNIK *et al.*, 2012).

Nos métodos tradicionais de fabricação de próteses, para se obter a geometria do membro original residual utiliza-se técnicas de moldagem e fundição de materiais como gesso e plástico (GOH; LEE; NG, 2002). Com estas técnicas, até 95% das pessoas que perderam o membro sofrem com desconforto ao menos por algum tempo (LUNSFORD *et al.*, 2016). Um dos pontos positivos da impressão 3D é a capacidade de armazenamento e digitalização da reconstrução anatômica do membro residual, permitindo assim que tais dados estejam disponíveis e salvos para acompanhamento das alterações na anatomia do amputado ao longo do tempo, possibilitando melhorias nos protótipos e também investigação de melhorias (LUNSFORD *et al.*, 2016).

Silva *et al.* (2015) afirmam que em virtude da força e resistência limitada dos materiais utilizados por algumas impressoras 3D mais acessíveis, as próteses confeccionadas por esta técnica de manufatura são mais adequadas para uso pediátrico.

Tymrak, Kreiger e Pearce (2014) e Silva *et al.* (2015), apontam uma lacuna no conhecimento no que tange as características estruturais das próteses confeccionadas por manufatura aditiva. Desta forma, uma alternativa simples que pode propiciar a utilização desta tecnologia em tratamentos adultos, é viabilizar o acesso a informações precisas referente as características e limitações estruturais das próteses. Uma outra opção é a adição de aditivos para reforçar as propriedades mecânicas dos materiais imprimíveis de modo a aumentar a durabilidade as condições de uso a que tais próteses serão sujeitas (SILVA *et al.*, 2015).

Embora os custos com uma prótese variem conforme a região e o material de composição, a faixa de valores de próteses de membros superiores típicos variam de U\$ 4.000,00 à U\$ 100.000,00 (RESNIK *et al.*, 2012), (Tabela 2.8).

Enquanto que próteses de mão mecânicas feitas por manufatura aditiva variam de U\$ 50,00 à U\$ 200,00 (SILVA *et al.*, 2015). A Tabela 2.8 apresenta a margem de custo de dispositivos protéticos estimados em Nova York em 2011 (RESNIK *et al.*, 2012).

Todavia, como já mencionado, há na literatura, uma escassez de trabalhos consistentes no que tange a análises funcionais e estruturais das próteses confeccionadas por impressão 3D em comparação com os dispositivos tradicionais, o que demanda investigações adicionais.

Próteses e encaixes protéticos carecem de substituições, modificações e reparos periódicos mesmo que não haja muitos estudos estatísticos sobre a frequência de substituições

Tabela 2.8 – Estimativa de custo das próteses de mão fabricadas por processos atuais (\*1000).

<b>Tipo de Prótese</b>	<b>Tipo de Controle</b>	
Próteses de Membro Superior Transumeral Transradial	Controladas pelo corpo	Controladas externamente
	U\$5 – U\$ 10 U\$4 – U\$ 8	U\$50 – U\$ 75 U\$25 – U\$ 50
Próteses de Membro Inferior Transfemoral Transtibial	Não controladas	Controladas por microprocessadores
	U\$15 – U\$ 25	U\$50 – U\$ 100
	U\$5 – U\$ 15	U\$40 – U\$ 100

Fonte: Adaptado de [Resnik et al. \(2012\)](#).

e novas prescrições no que se refere ao uso de próteses ([RESNIK et al., 2012](#)). Alguns trabalhos relatam que em média, amputados visitam o seu protista de 4 a 9 vezes por ano, sendo necessário a troca do dispositivo pelo menos uma vez ao ano ([PEZZIN et al., 2004](#)). Outros relatam que uma nova prótese é necessária a cada 4 a 5 anos, com o custo médio de manutenção em torno de U\$ 800,00 por ano ([DAKPA; HEGER, 1997](#)).

Observa-se assim, que o usuário se depara com altos custos com a aquisição de prótese bem como com a manutenção e substituição do dispositivo, em virtude do desgaste sofrido pelo mecanismo no decorrer de sua vida útil. Desta forma, é essencial a utilização de novas técnicas de fabricação capazes de fornecer próteses de qualidade, com resistência e à baixo custo. Logo, a impressão 3D possui um grande potencial para oferecer soluções viáveis para as barreiras relacionadas à tecnologia assistiva ([LUNSFORD et al., 2016](#)).

## 2.4 Prótese de Mão Confeccionada por MA Desenvolvida no LaMoP3D

A mão humana constitui-se em um membro altamente sofisticado e complexo, e a sua ausência promove um impacto expressivo na qualidade de vida de qualquer indivíduo, não somente o que concerne à questões físicas, mas também psicológicas. A perda do membro superior consiste em uma fonte de adaptação e engenhosidade, de modo a permitir a realização de atividades cotidianas como vestir-se, amarrar os sapatos, escovar os dentes, pentear os cabelos, passar fio dental, entre outros ([MATTIOLI et al., 2012](#); [NEDER, 1973](#); [SANTOS; MONTEIRO; CARNEIRO, 2015](#); [NOGUEIRA et al., 2007](#)).

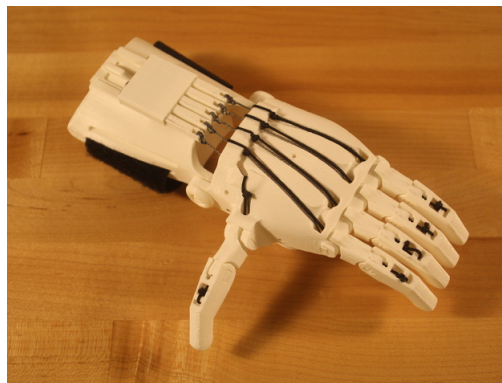
Uma preocupação comum, no tocante ao desenvolvimento de próteses, é proporcionar maior qualidade de vida ao usuário. Nesse contexto, no LaMoP3D tem sido pesquisadas, confeccionadas e aprimoradas, próteses de membro superiores e de baixo custo, fabricadas por MA, tendo em vista a reabilitação de pessoas com deficiência.

Conforme exposto no Capítulo 2.3, a comunidade E-Nable assim como outros sites

de impressão 3D, contam com diversos projetos de código aberto de próteses de mão. Contudo, uma característica marcante de tais projetos é a simplicidade anatômica e a unidade biomecânica.

Geralmente, as próteses disponíveis em livre compartilhamento possuem os dedos indicador, médio, anular e mínimo com mesma medida, além de estarem unidos de forma que as articulações de rotação metacarpofalangeal estejam no mesmo eixo de rotação, perpendicular ao eixo central do antebraço. Ademais, o polegar situa-se cerca de 90° a partir do eixo longitudinal da prótese, como pode ser visualizado na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Modelo de prótese de mão disponível para livre compartilhamento (Raptor Reloaded).



Fonte: [enablingthefuture.org](http://enablingthefuture.org).

Todavia, buscando contribuir com o processo de desenvolvimento de próteses, que proporcionem um projeto anatomicamente mais similar ao da mão humana, preservando características como o baixo custo e peso, o LaMoP3D da Universidade Federal de Goiás desenvolveu um dispositivo protético biônico para casos de amputação transradial. Ainda, o projeto almeja promover o uso tanto adulto quanto pediátrico.

### 2.4.1 Prótese Biônica - ALX

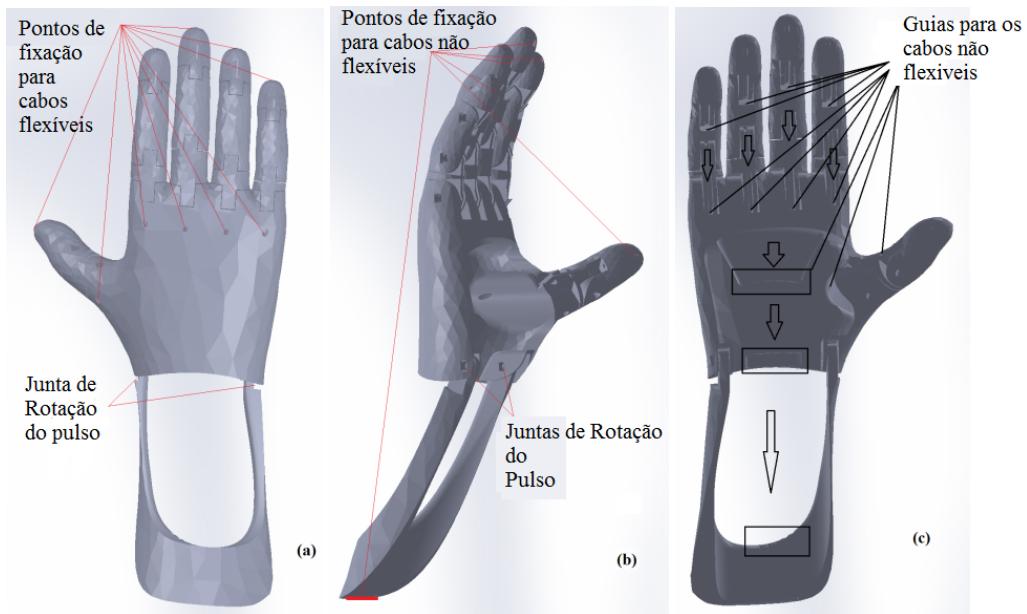
A principal aplicação dos materiais termoplásticos, (estudados nesse trabalho) no LaMoP3D, é a confecção de próteses de mão de baixo custo. Nesse âmbito, observa-se a importância do conhecimento das limitações dos materiais empregados na manufatura dos dispositivos protéticos, de forma a garantir maior segurança e confiabilidade para o bom desempenho da prótese em ações ordinárias.

Dessa forma, as informações apresentadas e condensadas neste trabalho são de grande relevância para a adaptação e uso dos dispositivos confeccionados no LaMoP3D.

Em continuidade, foi desenvolvida no LaMoP3D, em parceria com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, uma prótese de mão biônica, denominada ALX, que corresponde a um aprimoramento do dispositivo mecânico exposto na Figura 2.9. O projeto criado

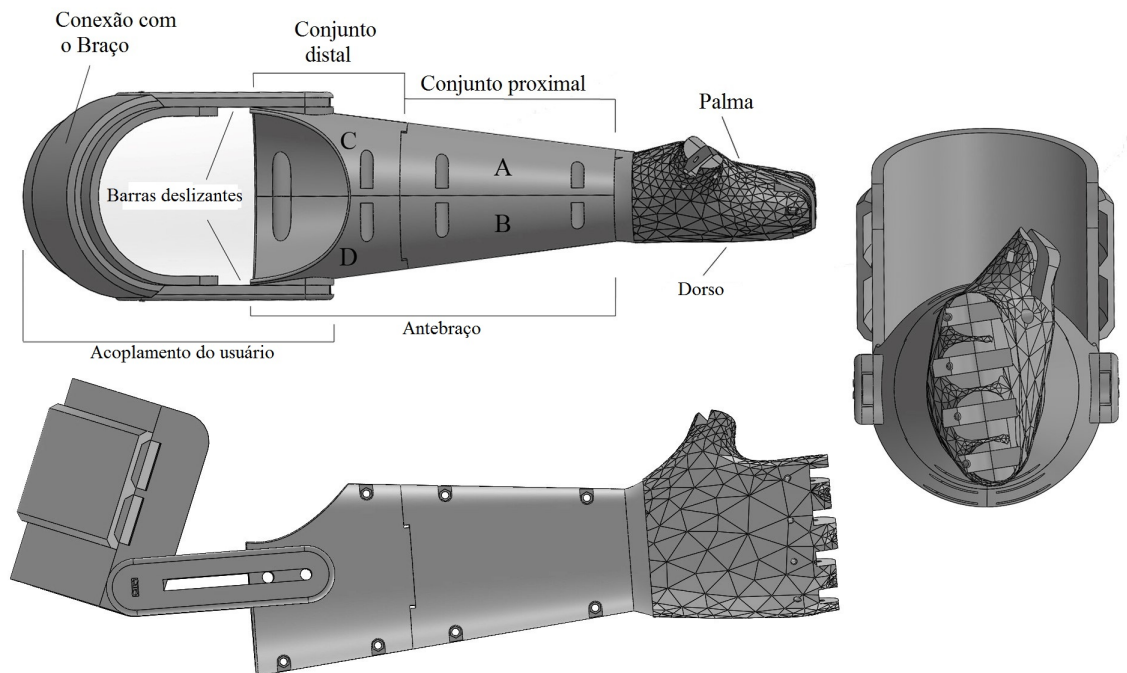
dispensa a necessidade de flexão do pulso, podendo ser indicada, conseqüentemente, para usuários com amputação transradial Figura 2.10.

Figura 2.9 – Prótese mecânica anatômica.



Fonte: Adaptado de *Stoppa et al. (2017)*.

Figura 2.10 – Visão detalhada da prótese ALX (sem dedos).

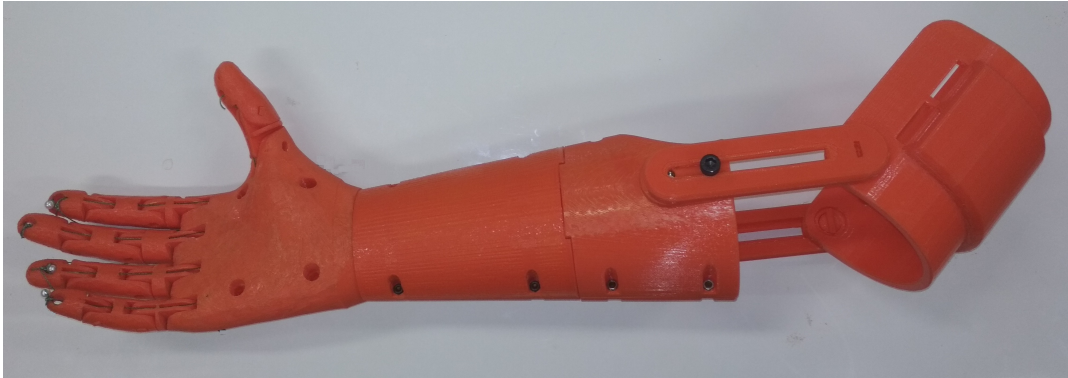


Fonte: Adaptado de *Stoppa et al. (2017)*.

A prótese ALX é composta por quatro partes: antebraço, palma e dorso, dedos e acoplamento do usuário (Figura 2.11).

Figura 2.11 – Prótese ALX.

(a) Vista palmar



(b) Vista dorsal

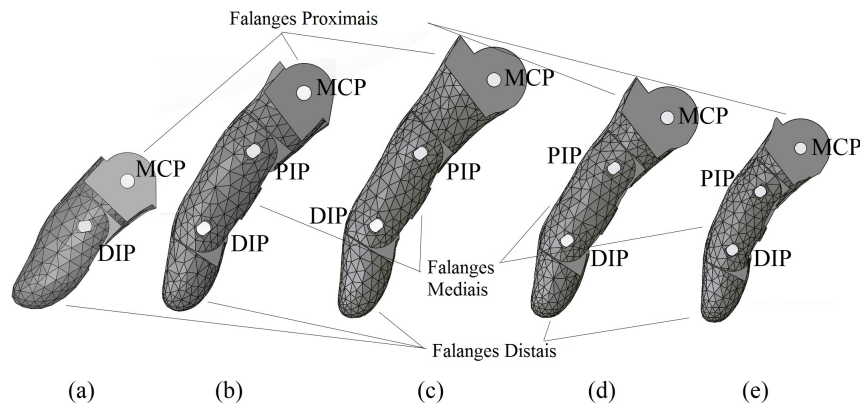


Fonte: A autora.

O projeto inicial dos dedos foi conservado e a proporção anatômica desses foi mantida, e apesar das articulações metacarpofalangeais estarem na mesma linha da mão, o comprimento das falanges medianas compensam a distância natural das articulações interfalângicas proximais.

Os dedos indicador, médio, anular e mínimo são constituídos por 3 falanges: proximal, média e distal, com 3 articulações de rotação: metacarpofalangeana (MCP) que articula os dedos à mão, interfalangeal proximal (PIP) que liga a falange proximal e média, e finalmente a interfalângica distal (DIP) que liga a falange média e distal (Figura 2.12). Ao passo que o polegar, é composto por somente 2 falanges: proximal e distal, com 2 articulações de rotação: metacarpofalangeal (MCP) que juntam os dedos à mão e distal interfalângica (DIP) que liga falange proximal e distal.

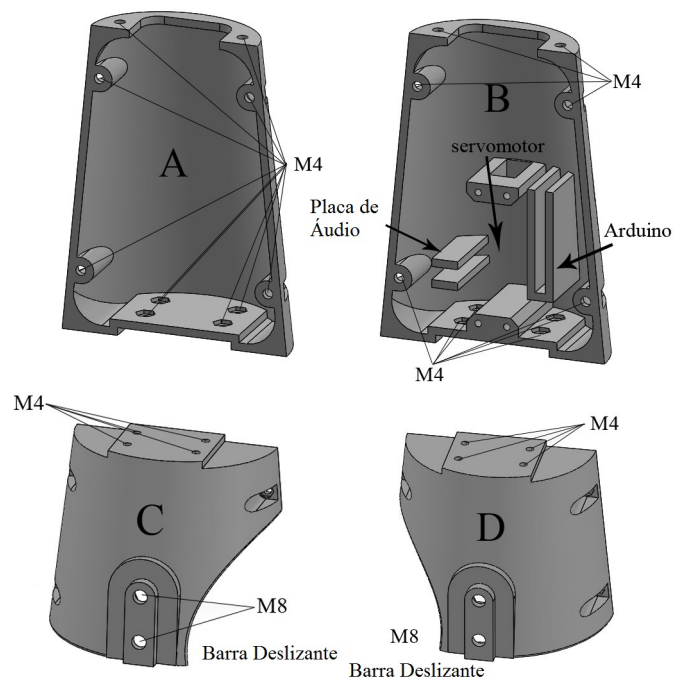
Figura 2.12 – Dedos: (a) polegar, (b) indicador, (c) médio, (d) anular, (e) mínimo.



Fonte: Adaptado de [Stoppa et al. \(2017\)](#).

O antebraço, consiste na combinação de 4 partes, conforme Figura 2.13, são elas: o conjunto distal (em relação ao cotovelo) constituído das partes A e B; e o conjunto proximal dado pelas partes C e D. O sistema de controle servo-motor e o sistema de compensação de cabos, estão dispostos no conjunto distal.

Figura 2.13 – Composição do antebraço.



Fonte: Adaptado de [Stoppa et al. \(2017\)](#).

O sistema eletromecânico da prótese é formado por um servomotor, uma bateria, um controlador Arduino<sup>®</sup>, uma placa de aquisição de áudio e por último, um microfone. A

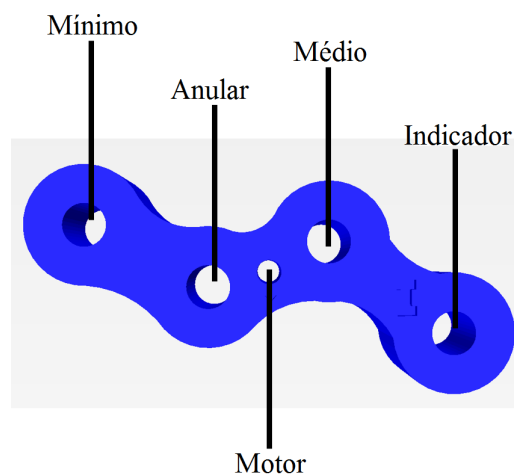
bateria está no interior do dorso da mão. Já a placa de áudio, o Arduino e servomotor, estão localizados na parte B da prótese, conforme indicação na Figura 2.13.

O servomotor utilizado consiste em um Futaba BLS152 Brushless de uso comum em projetos de aeromodelismo, suas dimensões correspondem a 40.5 x 21 x 38.4mm. Ele apresenta uma velocidade de desempenho de 0.14 seg/60° e um torque de 31 Kg/cm a 6V e pesa cerca de 73g.

O servomotor é responsável por realizar o movimento de prensão, para tanto ele conta com o auxílio de uma roldana que aciona o sistema de compensação de cabo, o qual está ligado à cabos não flexíveis em cada dedo. O uso do sistema de compensação visa fornecer uma melhor adaptação dos dedos na prensão de objetos irregulares. Ele está localizado no interior do antebraço e a sua geometria é dada na Figura 2.14.

A Figura 2.14 apresenta o sistema de compensação considerada no estudo. O uso de tal sistema visa aproximar o movimento de flexão dos dedos ao real, no tocante à prensão de objetos com geometrias diversas.

Figura 2.14 – Sistema de compensação dos dedos da prótese ALX.



Fonte: A autora.

Em resumo, as principais características da prótese consistem na sua forma anatômica, na posição de repouso semelhante a mão humana real, devido ao sistema de compensação situado no comprimento do antebraço e a seu peso mais leve que o membro natural. Pois, todo o protótipo, incluindo a placa de áudio, Arduino, servomotor, bateria, cintas de velcro, microfone, fios e demais conexões, não excedem 800 gramas.

A estrutura da prótese foi confeccionada pela técnica de impressão 3D por extrusão de material. O material utilizado foi o PLA, termoplástico de boa processabilidade, bom acabamento e aparência, além de ser biodegradável.

Buscando fornecer subsídios científicos para futuras melhorias no dispositivo aqui apresentado, uma análise básica da prótese será efetuada no Capítulo 6. Tal análise visa conhecer a capacidade de tração que o servomotor exerce no sistema de compensação, durante o movimento de preensão, tendo em vista identificar possíveis perdas e a real força exercida pelo motor em cada falange no momento da flexão dos dedos.



## Capítulo 3

---

# Estado da arte da Caracterização de Materiais Termoplásticos

---

Estudos têm sido realizados de modo a melhorar e otimizar o processo de impressão 3D, visando obter componentes de alta qualidade em uma vasta gama de máquinas de manufatura aditiva comerciais (LEE; ABDULLAH; KHAN, 2005).

Conforme aponta a literatura, as propriedades mecânicas das peças confeccionadas por ME podem ser influenciadas por variações nos valores dos parâmetros de processo, tais como a espessura da camada, orientação de impressão, número de contornos, temperatura de extrusão, velocidade de impressão, entre outros (LEVENHAGEN; DADMUN, 2017; ALVA-REZ; LAGOS; AIZPUN, 2016). Sabe-se ainda que a anisotropia relativa à direção de construção do objeto é um problema exibido na maioria das tecnologias de impressão 3D (TORRADO *et al.*, 2015).

Nessa conjuntura, nos últimos 5 anos tem-se intensificada a quantidade de trabalhos que buscaram analisar os efeitos de variações nos parâmetros de impressão, sobre as propriedades gerais dos objetos impressos. Os trabalhos presentes na literatura, majoritariamente, avaliaram a resistência à tração de componentes impressos em ME conduzidos pela norma ASTM D638.

Os principais parâmetros pesquisados correspondem a espessura da camada, entretramas orientação de impressão, cor do material, ângulo de preenchimento, velocidade de impressão, temperatura de extrusão e número de contornos. Verificou-se que os parâmetros entretramas, ângulo de preenchimento, número de contornos, e a cor do material mostram-se ser fortemente influentes na resistência à tração dos objetos impressos (CROCCOLO; AGOSTINIS; OLMI, 2013; AHN *et al.*, 2002; TYMRAK; KREIGER; PEARCE, 2014; WITTBRODT; PEARCE, 2015; BAYRAKTAR *et al.*, 2016).

Ahn *et al.* (2002) procurou caracterizar algumas propriedades anisotrópicas de componentes ABS impressos em FDM. As amostras do teste de tração foram inicialmente mo-

deladas com base na norma ASTM D638-97, contudo algumas complicações nos espécimes fizeram com que fosse adotada e adaptada, a norma ASTM D3039-76, para fabricação destas. As amostras para o teste de compressão foram confeccionadas com base na norma ASTM D695-96. As variáveis estudadas foram: entretrama, largura da camada, temperatura do modelo, cor do ABS e orientação de impressão. Foram geradas de três a cinco amostras para cada configuração de impressão. Os moldes produzidos por FDM foram comparados às amostras produzidas por moldagem por injeção, confeccionadas com mesmo material. Os experimentos evidenciaram que o entretrama e a orientação de impressão têm efeitos significativos sobre a resistência à tração. Para análise de resistência a compressão somente a orientação de impressão foi estudada. Algumas conclusões obtidas com o estudo foram: descontinuidades dos caminhos reduzem a resistência da peça à tração; amostras FDM com orientação axial apresentam maior resistência à tração, mas ainda com resultados 65% a 72% inferior aos obtidos por moldes por injeção; entretrama negativo aumentam a força axial e a rigidez do objeto construído.

Os resultados alcançados por [Ahn \*et al.\* \(2002\)](#) para a resistência à compressão dos espécimes FDM são superiores aos da resistência à tração. Um estudo mais elaborado sobre esta evidência é feito por [Lee \*et al.\* \(2007\)](#), que focou na análise de resistência à compressão de peças confeccionadas por FDM. Nesse trabalho, as amostras foram construídas com base na variação da orientação de construção e os resultados determinaram que a resistência a compressão é maior para os espécimes impressos com orientação axial do que para aqueles com orientação transversal.

[Croccolo, Agostinis e Olmi \(2013\)](#) investigaram o efeito de dois fatores nas propriedades finais de componentes impressos: o número de contornos e a orientação de impressão. O material utilizado foi o ABS M30, comumente empregado na confecção de peças FDM. O estudo foi tratado com uma abordagem experimental e outra analítica, com a determinação de um modelo preditivo. O modelo foi capaz de prever satisfatoriamente a região elástico-linear do diagrama tensão-deformação do material, obtido por intermédio de testes de tração regulamentados pela norma ASTM D638-10. As amostras consideradas no teste contaram com 1, 4, 7 e 10 contornos, orientadamente impressas ao longo da espessura e ao longo de um eixo principal. Ademais, os testes experimentais evidenciaram que as amostras apresentavam um comportamento mais frágil a medida que o número de contornos era aumentado.

[Onwubolu e Rayegani \(2014\)](#) propuseram um modelo preditivo, considerando variações dos parâmetros: espessura da camada, orientação de impressão, ângulo de preenchimento, largura da trama e o entretrama. O material considerado foi o ABS e para realização dos testes de tração foi considerado o padrão UTS (Unit Testing System). O estudo baseou-se no Método de Grupo para Tratamento de Dados (Group Method for Data Handling - GMDH) em conjunto com um método diferencial (Differential Evolution - DE) para analisar a rela-

ção funcional entre os parâmetros de impressão e a resistência à tração das amostras. Os testes mostraram a eficiência do modelo de predição proposto e verificou a influência dos parâmetros testados sobre as características estruturais das peças fabricadas.

Tymrak, Kreiger e Pearce (2014) realizaram um estudo visando quantificar a resistência à tração e o módulo de elasticidade de peças produzidas em FDM. As amostras foram confeccionadas segundo a norma ASTM D638. Os parâmetros considerados foram a espessura da camada e a orientação de impressão dos componentes. Como ocorrido com Ahn *et al.* (2002) muitas amostras romperam fora do comprimento útil em virtude das grandes concentrações de tensão nas regiões de descontinuidades, isto é, com alteração na geometria. Em razão destas complicações, dos 90 testes considerados apenas 66 foram conclusivos e considerados para análise. Os resultados evidenciaram que o ABS e o PLA apresentaram maior resistência à tração para uma menor espessura da camada. Em média, a resistência à tração apresentada pelo ABS foi de 28,5 MPa e 56,6 MPa para o PLA com módulos de elasticidade médios de 1.807 MPa e 3.368 MPa para ABS para PLA, respectivamente.

Wittbrodt e Pearce (2015) analisaram o efeito da cor do filamento PLA na resistência à tração do objeto construído. As cores consideradas foram: natural, branco, preto, cinza e azul, ambas de um mesmo fornecedor. As amostras foram todas impressas sob as mesmas configurações, sendo que a embalagem do filamento foi aberta somente no momento do uso. Os testes foram conduzidos sob a norma ASTM D638-10. O experimento contou com análises microscópicas de modo a avaliar porcentagem de cristalinidade do material. Os resultados do estudo evidenciaram uma forte relação entre a resistência à tração e a porcentagem de cristalinidade do material bem como da porcentagem de cristalinidade do filamento com a temperatura de extrusão. Observou-se ainda que as amostras confeccionadas com PLA colorido têm sua resistência à tração reduzida, indicando que a presença de pigmentos para coloração do material afeta as propriedades mecânicas do objeto construído.

Kumar *et al.* (2015) investigaram os benefícios da galvanoplastia de níquel sobre peças PLA impressas em FDM. O trabalho buscou analisar o desempenho da combinação de revestimentos metálicos ao polímero usado no processo de impressão 3D. As propriedades mecânicas avaliadas foram resistência à tensão, resistência ao impacto e dureza. Os experimentos foram regidos pelas normas ASTM D638, ASTM D256 e ASTM D2240. Os autores propuseram ainda um modelo de predição para o módulo de Young das amostras revestidas. As respostas previstas com o modelo teórico se aproximaram dos resultados obtidos com os testes físicos, mostrando a eficiência do modelo. Os resultados experimentais evidenciaram que o revestimento mais espesso aumenta a resistência à tração e ao impacto, contudo reduzem a dureza dos espécimes e a porcentagem de alongamento das amostras. Verificaram assim que revestimentos eletro-depositados acarretam em uma melhora nas propriedades mecânicas do PLA.

Griffiths *et al.* (2016) analisou os efeitos de diferentes parâmetros de impressão são

eles, porcentagem de preenchimento, número de contornos, espessura da camada e orientação da impressão. O experimento foi realizado em conformidade com a norma ISO 527-2. Em seu trabalho, [Griffiths et al. \(2016\)](#) constatou que para otimizar as propriedades de tração, o percentual de preenchimento e o número de contornos são os únicos parâmetros relevantes e que devem ser maximizados, já para otimizar quesitos de eficiência (apresentados na Tabela ), a altura máxima da camada, percentuais mais baixos de preenchimento e número de contornos devem ser empregados. O autor ressalta ainda a importância de estudos de caso para averiguar características principais de projetos em FDM, no que tange a confecção próteses e implantes.

[Torres et al. \(2016\)](#) verificou as propriedades de tração e fratura de componentes impressos em PLA pela técnica ME. Os testes foram regidos pelas normas ASTM D638 e D5045. Os resultados obtidos pela experimentação foram então analisados usando ANOVA para determinar a influência de cada configuração. Por meio do estudo realizado foi possível identificar determinados valores cujos quais os parâmetros propiciam melhor desempenho no que se refere a propriedade de tração e fratura. Os melhores resultados para a tração foram encontrados para 100%, 0.30 mm, 230°C, 60-90 mm/s, 90°/180° para densidade relativa, espessura da camada, temperatura de extrusão, velocidade de impressão e ângulo de preenchimento, respectivamente. Enquanto que as melhores respostas de resistência à fratura foram alcançadas por meio dos valores 100%, 0.10 mm, 230°C, 90-120 mm/s, 45°/135° para densidade relativa, espessura da camada, temperatura de extrusão, velocidade de impressão e ângulo de preenchimento, nessa ordem.

Assim como [Onwubolu e Rayegani \(2014\)](#), os autores [Bayraktar et al. \(2016\)](#) elaboraram, por intermédio de redes neurais artificiais (ARN), um modelo capaz de prever a resistência mecânica de objetos impressos em PLA. Em resumo, [Bayraktar et al. \(2016\)](#) verificaram a resistência à tração dos componentes, quando variados os parâmetros temperatura de extrusão, espessura da camada e o ângulo de preenchimento. Os resultados experimentais ressaltaram a eficiência do modelo ARN proposto, além de permitir avaliar a influência dos parâmetros testados sobre as características mecânicas das peças confeccionadas.

Ainda, as propriedades dielétricas do PLA impresso em ME foram analisadas por [Dichtl, Sippel e Krohns \(2017\)](#), verificando que estas, são semelhantes aos do material ácido polilático amorfo, proporcionando boas propriedades isolantes quando em temperaturas inferiores à de transição vítrea. O trabalho também aponta a aplicabilidade do PLA na fabricação de componentes eletrônicos a partir da manufatura aditiva.

[Wu et al. \(2017\)](#) avaliou a influência dos parâmetros de processo no efeito de memória de forma de modelos confeccionados em PLA. Os parâmetros considerados na pesquisa foram: a espessura da camada, a temperatura de deformação e a de restauração e o ângulo de preenchimento. Em seu estudo, [Wu et al. \(2017\)](#) identificaram que o parâmetro mais relevante para o efeito de memória de forma é a temperatura de restauração. A maior proporção

de restauração da forma foi de 98% e a maior taxa de recuperação foi de 2.036 mm/s. Os autores salientam uma potencial aplicabilidade do PLA impresso, na forma de implantes *stents* vasculares auto expansíveis.

A mistura de aditivos aos termoplásticos ABS e PLA, consiste em uma alternativa encontrada por alguns pesquisadores, com o intuito de melhorar propriedades mecânicas desejadas. Algumas aplicações foram abordadas por [Chang \*et al.\* \(2015\)](#) que analisou a adição de nanopartículas de ferro (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) ao PLA; [Torrado \*et al.\* \(2015\)](#) que avaliaram o efeito de diversos aditivos, tais como fibra vegetal, dióxido de titânio, entre outros, em amostras confeccionadas à base de ABS (ABS mais aditivos); [Christiyan, Chandrasekhar e Venkateswarlu \(2016\)](#) que estudaram a adição de silicato de magnésio hidratado em ABS; [Yu \*et al.\* \(2017\)](#) que analisaram os efeitos dos materiais grafeno e nanotubos de carbono em junção com o termoplástico PLA e também, [Levenhagen e Dadmun \(2017\)](#) que estudou a mistura de PLA de baixo peso molecular com o PLA comercial.

Conforme apresentado neste capítulo, é possível encontrar trabalhos que contribuam para uma melhor compreensão acerca das propriedades estruturais dos termoplásticos ABS e PLA. Todavia, restam ainda incertezas no que tange a influência dos parâmetros de impressão nas propriedades mecânicas finais de componentes confeccionados pela ME, necessitando de estudos adicionais. Parâmetros como a porcentagem, ângulo e a forma de preenchimento e a interação entre eles, ainda precisam ser avaliados.

Uma visão geral dos trabalhos existentes na literatura, que exploraram as propriedades mecânicas de componentes impressos com a tecnologia de impressão por extrusão de material, é dada na Tabela 3.1.

Observa-se que na literatura, não se encontram trabalhos aprofundados referentes as variações e tipos de preenchimento. Tais fatores são essenciais para a minimização de peso e redução de material em objetos impressos, e portanto consistem no foco principal deste estudo.

Tabela 3.1 – Visão geral dos trabalhos envolvendo a caracterização de materiais de peças impressas.

<b>Autor</b>	<b>Propriedades Mecânicas</b>	<b>Material</b>	<b>Parâmetros Estudados</b>
<i>Ahn et al. (2002)</i>	Tração e compressão	ABS	entretrama, largura da camada, temperatura do modelo, cor do ABS e orientação de impressão
<i>Lee et al. (2007)</i>	Compressão	ABS	Orientação de impressão
<i>Croccolo, Agostinis e Olmi (2013)</i>	Tração e Rigidez	ABS	Número de contornos e orientação de impressão
<i>Onwubolu e Rayegani (2014)</i>	Tração	ABS	espessura da camada, orientação de construção, ângulo da trama, largura da trama e o entretrama
<i>Tymrak, Kreiger e Pearce (2014)</i>	Tração	ABS e PLA	Espessura da camada e a orientação de impressão
<i>Torrado et al. (2015)</i>	Tração	ABS	Aditivos no material
<i>Wittbrodt e Pearce (2015)</i>	Tração	PLA	Cor
<i>Chang et al. (2015)</i>	Tração e flexão	PLA	Adição de nano-partículas de óxido de ferro.
<i>Christiyan, Chandrasekhar e Venkateswarlu (2016)</i>	Tração e flexão	ABS	Espessura da camada, velocidade de impressão e orientação de impressão
<i>Torres et al. (2016)</i>	Tração e fratura	PLA	Espessura da camada, porcentagem e ângulo de preenchimento, temperatura de extrusão, velocidade e orientação de impressão.
<i>Griffiths et al. (2016)</i>	Medidas de desempenho (tração e módulo de elasticidade); Medidas de eficiência (tempo de impressão, consumo de energia, peso da peça, peso dos fragmentos)	PLA	Porcentagem de preenchimento, número de contornos, espessura da camada e orientação da impressão.
<i>Bayraktar et al. (2016)</i>	Tração e superfície de fratura	PLA	Temperatura de extrusão, ângulo de preenchimento e espessura da camada.
<i>Yu et al. (2017)</i>	Reológicas, térmicas, mecânicas (tração e flexão) e condutividade elétrica.	PLA	Aditivos no material (Grafo e nanotubos de carbono - CNT).
<i>Levenhagen e Dadmun (2017)</i>	Tração	PLA	Combinação de PLA comercial mais PLA de baixo peso molecular.
<i>Dichtl, Sippel e Krohns (2017)</i>	Dielétricas	PLA	O próprio material (amorfo e semicristalino).
<i>Wu et al. (2017)</i>	Efeito de memória de forma	PLA	Temperatura de deformação, temperatura de restauração, espessura da camada e ângulo de preenchimento.

Fonte: A autora.

## Capítulo 4

---

# Materiais e Métodos

---

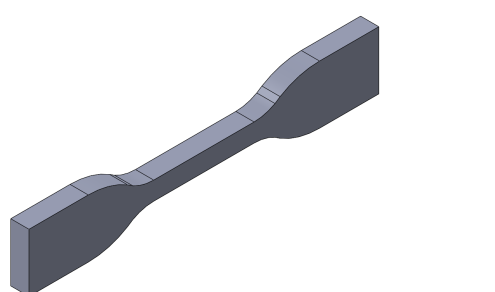
A investigação do desempenho dos componentes fabricados pela técnica de impressão 3D por extrusão de material envolve a confecção de modelos de teste e a realização de ensaios experimentais. A forma do modelo de teste é regida por normas padronizadas, visando a validação do estudo. Na presente pesquisa, foi utilizada a norma [ASTM:D638 \(2014\)](#) responsável por determinar os métodos de teste padrão para análise das propriedades de tração de materiais plásticos.

A metodologia empregada pode ser dividida em três etapas: a primeira compreendendo o projeto do modelo a ser testado; a segunda, abrangendo a definição dos parâmetros do processo e a terceira, equivalente a impressão dos corpos de prova.

- Configuração do Modelo de Teste

A norma [ASTM:D638 \(2014\)](#) prevê especificações do material, dimensões e formas dos modelos de testes. A geometria do corpo de prova foi desenhada no *software Sketchup*, conforme apresentado na Figura 4.1:

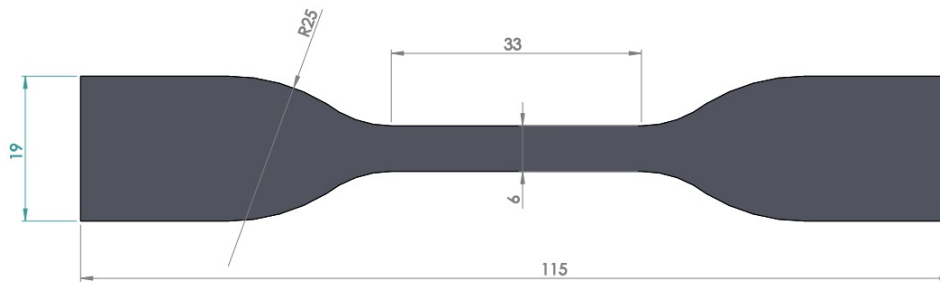
Figura 4.1 – Modelo de Corpo de prova.



Fonte: A autora.

As dimensões dos corpos de prova a serem testados são apresentados na Figura 4.2, tendo sua espessura do modelo de teste equivalente à 6 mm.

Figura 4.2 – Dimensões do Corpo de prova.



Fonte: A autora.

Os dados CAD do modelo foram então convertidos em formato de arquivo .STL e posteriormente importados em um *software* de corte. Tal *software* realizará um fatiamento do modelo em camadas paralelas à base de apoio e gerará as instruções de impressão, denominadas Gcode. Para a construção do Gcode foi utilizado o *software* Slic3r, por intermédio da plataforma Repetier-Host.

- Definição dos Parâmetros de Processo

O intuito deste trabalho é efetuar a caracterização dos materiais termoplásticos comumente empregados no processo de impressão 3D, buscando maiores conhecimentos sobre as propriedades mecânicas dos mesmos. Dessa forma, foram considerados para análise os seguintes materiais polímeros: ABS, PLA e PET-G. Em virtude das características anisotrópicas dos componentes impressos por essa técnica de produção, e em consonância a norma padrão adotada, admitiu-se duas configurações de impressão, uma normal e outra axial ao eixo da anisotropia.

A análise de tração das amostras, paralelamente e perpendicularmente impressas, permite obter maior compreensão das propriedades de ligação dos componentes impressos. Segundo [Alaimo et al. \(2017\)](#), os ensaios de tração realizados em corpos de teste axialmente construídos permitem conhecer as propriedades intra-fibras do modelo impresso, basicamente, a resposta mecânica obtida dependerá principalmente do comportamento mecânico da fibra do componente confeccionado. Já, corpos de teste construídos perpendicularmente, são propícios para se obter as propriedades entre as fibras, ou seja, as características mecânicas do processo de ligação das peças confeccionadas por impressão 3D.

Devido à lacuna de informações na literatura, no que tange a caracterização de materiais com variação na porcentagem e tipo de preenchimento, estes parâmetros foram os considerados para investigação.

Isto posto, os valores para os parâmetros de processo foram então definidos com base na literatura, na deficiência de informações no que concerne as propriedades finais de ob-

jetos impressos e em conformidade com o *software* de corte empregado. As Tabelas 4.1 e 4.2 exibem os valores adotados para cada parâmetro do processo.

Tabela 4.1 – Parâmetros de impressão variáveis.

Parâmetros	Valores
Material	ABS e PLA
Ângulo de Preenchimento	0° e 45°
Tipo de Preenchimento	Linear, retilinear, colméia
Porcentagem de Preenchimento	10%, 25%, 50% e 100%

Fonte: A autora.

A Tabela 4.1 exhibe os quatro fatores que serão avaliados, juntamente com os seus respectivos níveis, os quais foram considerados para teste.

Durante o procedimento, os fatores que foram mantidos fixos são observados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Parâmetros de impressão fixos.

Parâmetros	Valores
Altura da Camada	0.2 mm
Velocidade de Impressão	30 mm/s
Orientação de Impressão	0°

Fonte: A autora.

Os níveis adotados para o fator porcentagem de preenchimento foram definidos com base em experiências passadas em demais projetos desenvolvidos no LaMoP3D, tendo em consideração aplicações práticas reais.

- Impressão dos Corpos de Prova

As impressoras 3D, utilizadas para a impressão dos modelos de teste, são: Prusa Mendel e Graber i3. As máquinas estão equipadas com um extrusor cujo bocal possui 0.4 mm de diâmetro. As temperaturas para a base e o bocal de impressão foram determinadas com base em recomendações do fabricante dos filamentos. Os filamentos utilizados na confecção dos corpos de prova, são de um mesmo fabricante.

A impressão dos corpos de prova foi realizada segundo o roteiro procedimental apresentado no Apêndice A. A Tabela 4.3 apresenta as possíveis configurações de impressão a serem assumidas por cada material.

Foram impressas 6 amostras de cada configuração para análise. Dessa forma, para cada material será obtido um conjunto de 144 amostras totais para teste, de acordo com os fatores investigados. As seis amostras de cada configuração foram impressas simultanea-

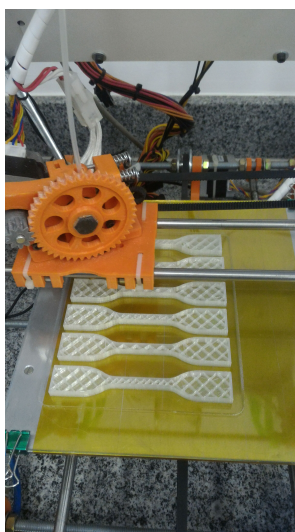
mente, conforme apresentado na Figura 4.3, de modo a propiciar as mesmas características às amostras.

Tabela 4.3 – Configurações dos Corpos de Prova.

Ângulo de Preenchimento	Tipo de Preenchimento	% de Preenchimento
0	Linear	10
0	Linear	25
0	Linear	50
0	Linear	100
0	Retilinear	10
0	Retilinear	25
0	Retilinear	50
0	Retilinear	100
0	Colméia	10
0	Colméia	25
0	Colméia	50
0	Colméia	100
45	Linear	10
45	Linear	25
45	Linear	50
45	Linear	100
45	Retilinear	10
45	Retilinear	25
45	Retilinear	50
45	Retilinear	100
45	Colméia	10
45	Colméia	25
45	Colméia	50
45	Colméia	100

Fonte: A autora.

Figura 4.3 – Confeção das amostras em impressora 3D.



Fonte: A autora.

Todavia, em decorrência de configurações internas das impressoras, envolvendo a combinação conjunta entre forma e porcentagem de preenchimento as configurações referentes à 100% de preenchimento, para os preenchimentos colméia e linear, não foram possíveis de serem realizadas.

As amostras foram armazenadas em sacos plásticos com sílica de forma evitar, ou pelo menos minimizar os níveis de umidade nos corpos impressos. A Figura 4.4 exibe o processo de identificação dos corpos de prova enquanto a Figura 4.5 expõe o processo de armazenamento destes.

Figura 4.4 – Identificação dos corpos de prova



Fonte: A autora.

Figura 4.5 – Armazenamento dos modelos de teste.



Fonte: A autora.

## 4.1 Teste de Tukey

Buscando avaliar o desempenho da variação de preenchimento, será aplicado o teste de Tukey (TSD) às médias da tensão última encontrada para cada configuração. Esse teste possui a finalidade de comparar múltiplas médias e analisar toda e qualquer diferença significativa entre elas, realizando a análise para todos os resultados, por intermédio de uma comparação em pares, isto é, tomadas duas a duas (CALLEGARI-JACQUES, 2003).

A análise de variância (ANOVA) verifica se há ao menos uma diferença significativa entre os dados, contudo não indica quais os tratamentos são significativamente diferentes entre si, quando comparados em pares. O reconhecimento de diferenças particulares entre as médias, deve ser efetuado por métodos de comparações múltiplas de médias, como o teste de Tukey (CALLEGARI-JACQUES, 2003).

A estratégia adotada pelo teste TSD fundamenta-se na amplitude da distribuição *studentizada*, e seu emprego justifica-se por seu rigor, visto que esse, é um dos poucos métodos exatos para múltiplas comparações e utiliza apenas a menor diferença significativa para várias médias. Além disso, tal método é caracterizado ainda por sua fácil aplicação e também por controlar a taxa de erro experimental para comparações múltiplas quando o número de observações dos dados de tratamento são iguais (CALLEGARI-JACQUES, 2003; MASON; GUNST; HESS, 2003). Quando as amostras possuem tamanhos diferentes, a taxa de erro declarada é muito próxima do valor correto (MASON; GUNST; HESS, 2003).

O teste TSD é dado da seguinte forma (MASON; GUNST; HESS, 2003; GONZALEZ, 2009): Duas médias,  $\mu_i$  e  $\mu_j$ , a partir de  $n_i$  e  $n_j$  observações, nessa ordem, são significativamente diferentes se o valor absoluto de suas diferenças ultrapassar o valor TSD, isto é,

$$|\mu_i - \mu_j| > TSD \quad (4.1)$$

em que, para observações iguais, o TSD equivale à:

$$TSD = q(\alpha; k, gl) \sqrt{\frac{EQM}{n}} \quad (4.2)$$

no qual  $q(\alpha; k, gl)$  é o valor crítico tabelado dado a partir da amplitude total *studentizada*,  $k$  é o número de tratamentos a serem comparados,  $n$  é o número de réplicas,  $EQM$  é o erro quadrático médio do resíduo da ANOVA com base em  $gl$  graus de liberdade (número de variáveis independentes menos o número de parâmetros de tratamentos) e  $\alpha$  é o nível de significância.

Para todos os pares de médias testadas,  $\mu_i$  e  $\mu_j$ , o teste de Tukey fornece intervalos de confiança simultâneos, duas a duas, com um coeficiente de confiança de  $100(1 - \alpha)\%$ . Isto permite aos intervalos de confiança abranger todas as diferenças médias com uma pro-

babilidade de  $1 - \alpha$  (MASON; GUNST; HESS, 2003). Os intervalos de confiança são dados conforme a Eq. ((4.3)):

$$(\bar{x}_i - \bar{x}_j) - TSD \leq \mu_i - \mu_j \leq (\bar{x}_i - \bar{x}_j) + TSD \quad (4.3)$$

Segundo o teste de Tukey, se a diferença entre a maior média e a menor média não for significativa, nenhuma outra diferença será significativa. No entanto, a probabilidade de ao menos um erro do tipo I, ser igual à probabilidade de se declarar falsamente que a diferença entre a maior e a menor média em um conjunto de  $k$  médias, é significativa (GONZALEZ, 2009).

## 4.2 Procedimento Experimental

Os testes experimentais foram realizados com o apoio do Departamento de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Goiás Regional Catalão. Para a análise da resistência à tração do material, foi utilizado o sistema de teste universal servo hidráulico WDW-300E (Figura 4.6), pertencente ao Laboratório de Estruturas.

A máquina de teste é equipada com um computador que permite a aquisição de dados e controle de deslocamento e carga aplicada. Ainda, as amostras impressas foram testadas à temperatura ambiente e sua deformação foi mensurada manualmente com um calibre. Não utilizou-se equipamento de precisão robusta para medir a deformação sofrida pelo corpo de prova, visto que o objetivo da investigação era a obtenção do valor da tensão última da amostra.

Comumente utilizada para ensaios de aço e concreto, a máquina de ensaios de tração possui um sistema de travamento hidráulico, dificultando o engaste do corpo de prova polimérico, em razão de sua natureza sensível.

Os primeiros testes realizados, evidenciaram a fragilidade do material em relação a força aplicada na garra no momento do aperto do corpo de prova. Ademais, a forma brusca de fechamento da garra provoca uma tensão compressiva no modelo de teste, causando sensíveis deformações plásticas no material. A Figura 4.8 apresenta 3 amostras testadas na primeira sessão experimental.

A Figura 4.7a exibe uma amostra com 10% de preenchimento, retilinear. Tal amostra apresentou esmagamento da região de aperto, descaracterizando o ensaio. A Figura 4.8a expõe uma amostra com 50% de preenchimento, retilinear. Neste caso, apenas uma região de aperto foi engastada visando avaliar o uso da castanha e os danos causados a amostra. Este espécime não foi tracionado. A Figura 4.8b mostra uma amostra com 100% de preenchimento. Este modelo foi tracionado. A amostra com preenchimento sólido exibiu ruptura fora da região útil, em virtude concentrações de tensões na descontinuidade.

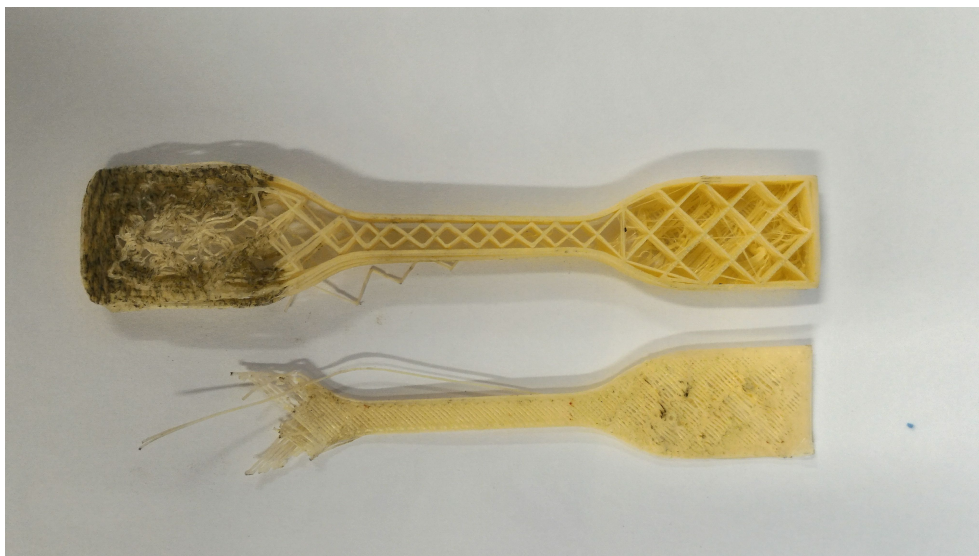
Figura 4.6 – Sistema de teste universal servo-hidráulico - Laboratório de Estruturas.

- (a) Máquina de Ensaio Universal WDW-300E (b) Célula de engaste do corpo de prova.



Figura 4.7 – Corpos de prova - Primeira sessão de ensaios (Castanha prismática).

- (a) Amostra com 10% de preenchimento.



Fonte: A autora.

Figura 4.8 – Continuação Corpos de prova - Primeira sessão de ensaios (Castanha prismática).

(a) Amostra com 50% de preenchimento.



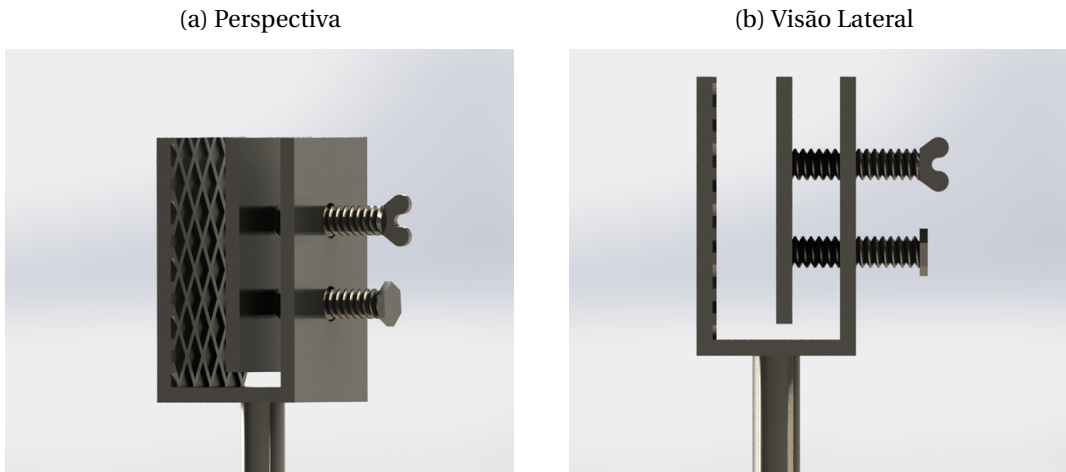
(b) Amostra com 100% de preenchimento.



Fonte: A autora.

Buscando minimizar o aperto abrupto da célula de carga, foram desenvolvidos, no LaMoP3D, projetos de suportes que revestissem ou comportassem o corpo de prova na célula de carga. O projeto inicial é apresentado na Figura 4.9.

Figura 4.9 – Modelo de suporte para aperto do corpo de prova na máquina de teste (versão 1).

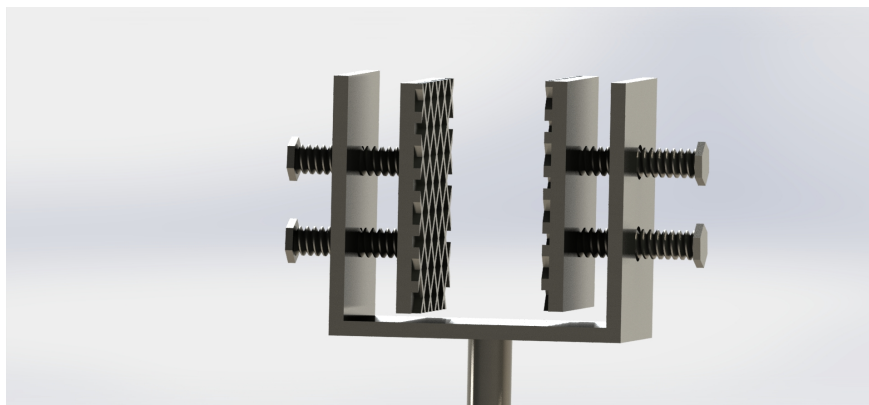


Fonte: A autora.

Para minimizar a influência do suporte no comportamento mecânico do corpo impresso, bem como para facilitar a centralização do corpo de prova em relação a célula de carga, melhorias foram realizadas no projeto inicial, contando com a inserção de ajustes simétricos e o desenvolvimento de uma base centralizadora, confeccionada por intermédio de impressão 3D.

A Figura 4.10 mostra a segunda versão do suporte empregado no travamento do corpo de prova na máquina de teste.

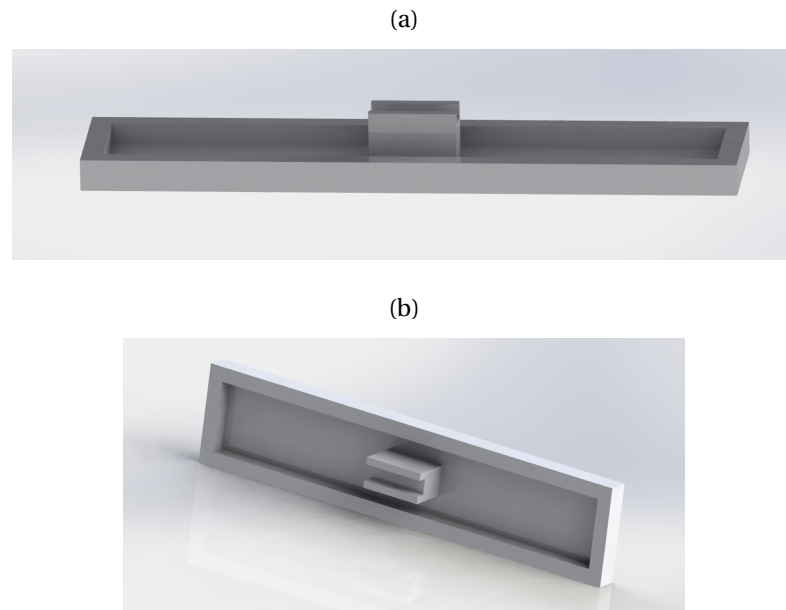
Figura 4.10 – Modelo de suporte para aperto do corpo de prova na máquina de teste (versão 2).



Fonte: A autora.

A Figura 4.11 apresenta a base centralizadora produzida com a tecnologia de impressão por extrusão de material.

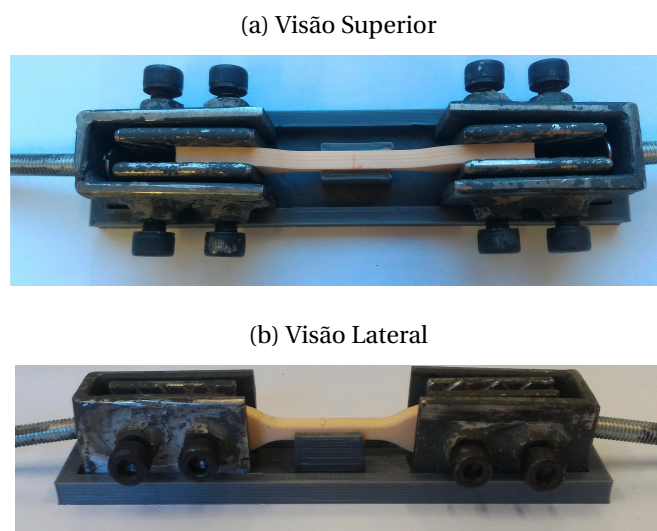
Figura 4.11 – Base centralizadora para o suporte.



Fonte: A autora.

O corpo de prova é centralizado no suporte com o auxílio da base impressa (Figura 4.12), de forma a minimizar a influência de momento, na resposta do teste experimental.

Figura 4.12 – Corpo de prova centralizado para teste.



Fonte: A autora.

Uma segunda sessão experimental foi então realizada, com o uso dos dispositivos desenvolvidos no LaMoP3D, visando a obtenção de resultados consistentes em relação as

propriedades mecânicas dos materiais polímeros utilizados no processo de impressão 3D. No entanto, a utilização deste protótipo não proporcionou ainda a conquista de resultados conclusivos.

O suporte criado não conseguiu garantir um aperto adequado, permitindo ao corpo de prova deslizar na área de aperto, durante a execução do ensaio. A Figura 4.13 expõe os corpos de teste utilizados nessa simulação. Como pode ser verificado, devido ao deslocamento do modelo, o carregamento aplicado não foi eficiente.

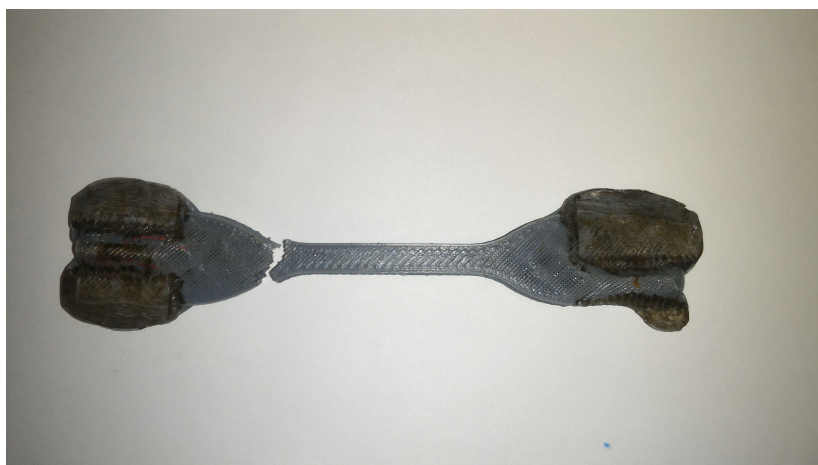
Figura 4.13 – Corpos de Prova - Segunda sessão de ensaios.



Fonte: A autora.

Na segunda sessão de ensaios, a castanha cilíndrica foi testada com o intuito de avaliar a capacidade desta em engastar o corpo de prova. A Figura 4.14 mostra um corpo de prova preso diretamente à célula de carga, com castanha cilíndrica.

Figura 4.14 – Corpos de prova - Segunda sessão de ensaios (preso sem suporte com castanha cilíndrica).



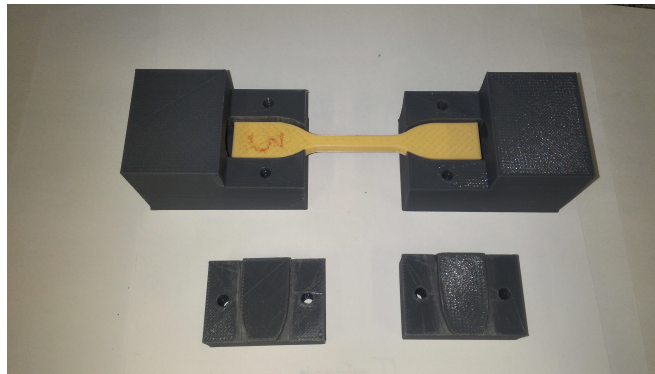
Fonte: A autora.

Assim como o ocorrido com o uso da castanha prismática (Figura 4.8b), a amostra tes-

tada com a castanha cilíndrica também rompeu fora da região útil devido a concentrações de tensão nas descontinuidades.

Finalmente, um terceiro suporte foi desenvolvido para a realização de novos testes (Figura 4.15). A partir do emprego deste novo mecanismo foi possível obter resultados consistentes no que concerne a resistência à tração dos modelos de teste impressos. Convém observar que, em virtude da configuração volumétrica do suporte dado na Figura 4.15, o mesmo não apresenta deformações excessivas que comprometam seu desempenho ou os resultados, ou ainda que interfiram na sua capacidade de engaste, sendo portanto, adequado para a presente aplicação.

Figura 4.15 – Modelo de suporte para aperto do corpo de prova na máquina de teste (versão 3).



Fonte: A autora.

Figura 4.16 – Corpo de prova preso a máquina de tração com o auxílio do suporte.



Fonte: A autora.

A análise estatística das respostas da resistência à tração dos polímeros PLA e ABS, obtidas por meio do procedimento experimental, podem ser verificadas no Capítulo 5.

Ainda, visando a determinação de um modelo de predição capaz de estimar a tensão última dos componentes impressos, por meio da definição básica dos parâmetros estudados, foi realizado ainda o estudo de mais 6 configurações básicas, são elas:

Tabela 4.4 – Configurações dos Corpos de Prova.

<b>Ângulo de Preenchimento</b>	<b>Tipo de Preenchimento</b>	<b>% de Preenchimento</b>
0	Linear	75
0	Retilinear	75
0	Colméia	75
45	Linear	75
45	Retilinear	75
45	Colméia	75

Fonte: A autora.

O modelo criado foi definido com base na técnica de regressão linear múltipla, com o auxílio do software R.

As amostras com 10% de preenchimento não forneceram resultados válidos, uma vez que todos os modelos de teste romperam fora da região útil. Portanto, os resultados referentes aos componentes impressos com essa porcentagem de preenchimento foram descartados. Constata-se assim, a necessidade de adaptações do corpo de prova para testes com 10% de preenchimento, em virtude de sua fragilidade.

Dessa forma, efetivamente, foram analisadas nesse estudo as seguintes configurações de impressão:

Tabela 4.5 – Configurações dos Corpos de Prova.

<b>Configuração</b>	<b>Porcentagem</b>	<b>Preenchimento</b>	<b>Ângulo</b>
C1	100	Retilinear	0°
C2	100	Retilinear	45°
C3	75	Retilinear	0°
C4	75	Retilinear	45°
C5	50	Retilinear	0°
C6	50	Retilinear	45°
C7	25	Retilinear	0°
C8	25	Retilinear	45°
C9	75	Colméia	0°
C10	75	Colméia	45°
C11	50	Colméia	0°
C12	50	Colméia	45°
C13	25	Colméia	0°
C14	25	Colméia	45°
C15	75	Linear	0°
C16	75	Linear	45°
C17	50	Linear	0°
C18	50	Linear	45°
C19	25	Linear	0°
C20	25	Linear	45°

Fonte: A autora.



## Capítulo 5

# Caracterização dos Materiais Termoplásticos ABS e PLA

Nesse capítulo são apresentados as respostas obtidas após a execução dos ensaios de tração. Foram testadas as amostras com as seguintes configurações: porcentagem de preenchimento: 25%, 50%, 75% e 100%; tipos de preenchimento: retilinear, linear e colméia; e o ângulo para impressão de 0° e 45°.

As leituras oriundas de corpos de prova que apresentaram ruptura fora da região útil, independente da porcentagem de preenchimento, foram desconsideradas para análise. Os resultados consistentes obtidos são sumarizados nas Tabelas 5.1 e 5.2, para o material ABS e nas Tabelas 5.3 e 5.4 para o material PLA.

Os resultados alcançados mostraram-se condizentes com a literatura no tocante a amostras com preenchimento sólido, validando dessa forma, as respostas alcançadas com os ensaios de tração dos modelos apesar das adaptações efetuadas para a realização dos testes experimentais.

A Tabela 5.1 expõe as médias encontradas para as tensões últimas das amostras confeccionadas em ABS, preenchidas a um ângulo de 0° com relação ao plano  $xy$ . A representação gráfica dos dados listados na Tabela 5.1, é mostrada na Figura 5.1.

Tabela 5.1 – Resistência média (MPa) dos componentes impressos em ABS com variação de preenchimento adotando o ângulo de impressão de 0°.

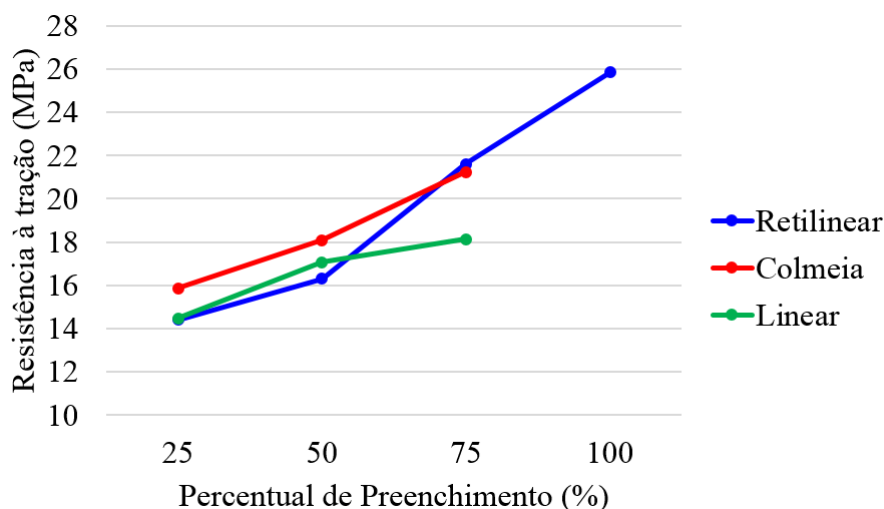
<b>Preenchimento</b>	<b>25%</b>	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>
Retilinear	14,39153	16,30917	21,61528	25,85077
Colméia	15,87174	18,07792	21,23355	-
Linear	14,46597	17,07250	18,12444	-

Observa-se que o preenchimento colméia, para as porcentagens 25% e 50%, apresenta um desempenho superior aos preenchimento retilinear e linear. Percebe-se ainda por

esse gráfico, que a resistência à tração para a forma de preenchimento retilinear cresce de maneira acentuada, conforme o aumento da densidade do sólido.

É possível notar através dos resultados exibidos, que a redução do preenchimento dos componentes impressos em ABS com a tecnologia de impressão 3D por extrusão de material, pode reduzir em média, considerando o pior caso estudado (25% retilinear - 100% retilinear), até 44% da resistência à tração dessas peças.

Figura 5.1 – Representação gráfica dos resultados médios obtidos para o ABS (ângulo 0°).



Fonte: A autora.

A Tabela 5.2 apresenta as tensões últimas médias das amostras impressas em ABS preenchidas à um ângulo de 45°. A representação gráfica dos dados listados na Tabela 5.2, é exposta na Figura 5.2.

Tabela 5.2 – Resistência média (MPa) dos componentes impressos em ABS com variação de preenchimento adotando o ângulo de impressão de 45°.

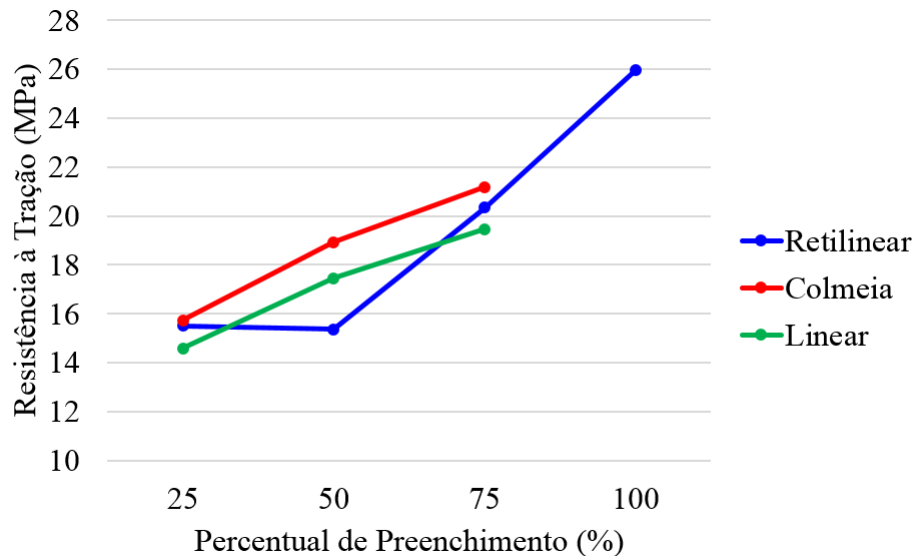
<b>Preenchimento</b>	<b>25%</b>	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>
Retilinear	15,50868	15,35972	20,34924	25,95319
Colméia	15,74139	18,92493	21,17771	-
Linear	14,58708	17,46354	19,46486	-

De modo semelhante aos resultados alcançados para o material ABS e ângulo de preenchimento 0°, a forma de preenchimento colméia teve um desempenho superior às demais, numa faixa percentual de 25% a 75% de preenchimento, haja visto que as médias das tensões últimas obtidas para esse padrão de preenchimento foram melhores, conforme Figura 5.2.

Nota-se que as respostas alcançadas para as percentagens 25% e 50% do preenchimento retilinear são próximas, contudo, inesperadamente, a tensão última média encon-

trada para o percentual de preenchimento de 50% foi inferior a obtida para o percentual de 25%.

Figura 5.2 – Representação gráfica dos resultados médios obtidos para o ABS (ângulo 45°).



Fonte: A autora.

As médias das tensões últimas das amostras impressas em PLA para o ângulo de 0° são exibidas nas Tabelas 5.3. A representação gráfica dos dados listados na Tabela 5.3, é exibida na Figura 5.3.

Tabela 5.3 – Resistência média (MPa) dos componentes impressos em PLA com variação de preenchimento adotando o ângulo de impressão de 0°.

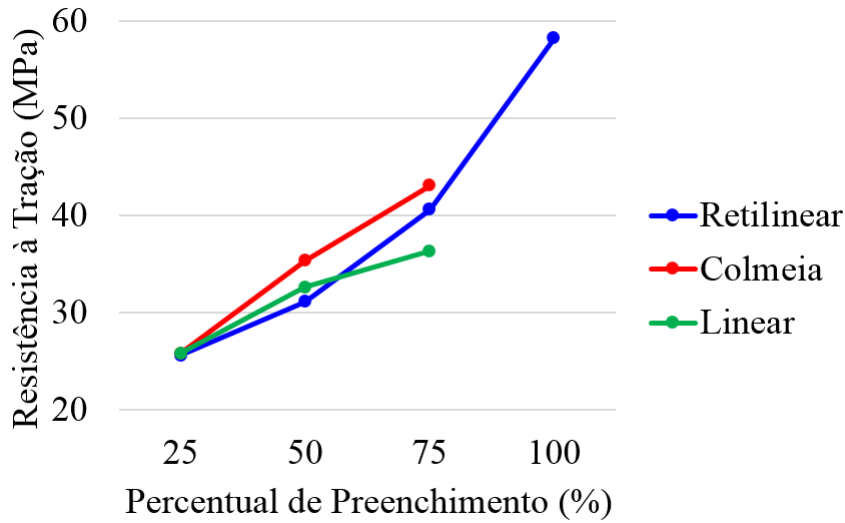
Preenchimento	25%	50%	75%	100%
Retilinear	25,64597	31,15688	40,61479	58,24945
Colméia	25,86014	35,37389	43,11875	-
Linear	25,82292	32,66500	36,33264	-

Em comparação aos modelos de teste impressos em ABS, ângulo de preenchimento 0°, verifica-se que os valores mais altos para a tensão última dos componentes confeccionados, foram encontrados para aqueles impressos em termoplástico PLA.

O padrão de preenchimento colméia também apresentou nesse caso desempenho superior aos demais, na faixa de percentual de 25% a 75%. Ademais, verificou-se que a redução no preenchimento dos modelos impressos em PLA pela técnica ME, pode acarretar na redução de até 55% (preenchimento retilinear 25%-100%) da resistência à tração dos componentes confeccionados.

Já as respostas médias obtidas pelos modelos em PLA impressos a um ângulo de preenchimento de 45°, foram sumarizadas na Tabela 5.4.

Figura 5.3 – Representação gráfica dos resultados médios obtidos para o PLA (ângulo 0°).

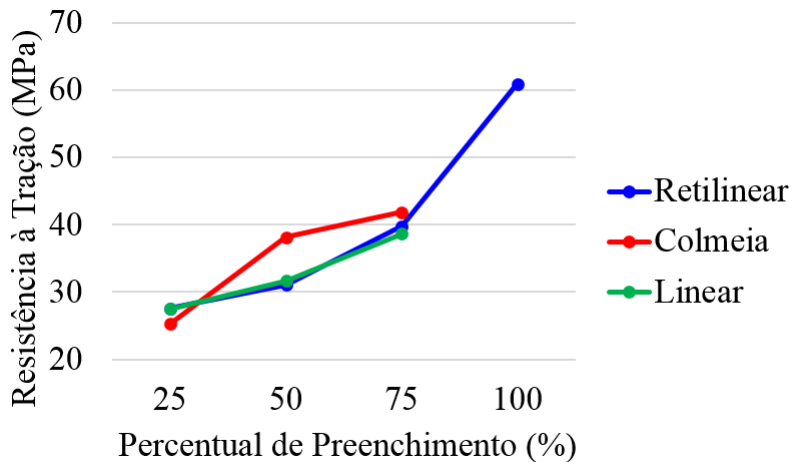


Fonte: A autora.

Tabela 5.4 – Resistência média (MPa) dos componentes impressos em PLA com variação de preenchimento adotando o ângulo de impressão de 45°.

<b>Preenchimento</b>	<b>25%</b>	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>
Retilinear	27,58236	31,05451	39,77701	60,94333
Colméia	25,22715	38,13854	41,89944	-
Linear	27,50778	31,65958	38,65993	-

Figura 5.4 – Representação gráfica dos resultados médios obtidos para o PLA (ângulo 45°).



Fonte: A autora.

As respostas encontradas para os preenchimentos, 25% e 50%, linear e retilinear, são próximas (Figura 5.4). Nota-se um destaque na resistência à tração dos modelos de teste preenchidos com a forma colméia e percentual de 50%.

Os componentes construídos utilizando o polímero PLA, segundo a configuração C2, forneceram o maior valor médio para a tensão última dos modelos de teste, equivalente a 60,94333 MPa.

Por meio dos dados tabelados, constata-se que um sólido confeccionado em PLA tem maior resistência mecânica que o mesmo projeto impresso em ABS. Para uma comparação mais robusta, será realizado um tratamento estatístico de modo a verificar diferenças significativas entre as amostras.

Tendo em vista, conhecer e compreender o impacto da redução do preenchimento, na resistência à tração dos componentes confeccionados pela técnica de impressão por extrusão de material, foi realizada uma análise estatística dos resultados obtidos.

Definido o tipo de material, o ângulo e a forma com que se irá preencher o objeto, averiguou-se a possibilidade de trabalhar com taxas menores de preenchimento garantindo uma resistência mecânica equivalente.

Busca-se por intermédio deste estudo, fornecer subsídios científicos suficientes para permitir a redução de percentuais de preenchimento de componentes impressos, preservando, todavia, a mesma eficiência mecânica oferecida por componentes totalmente preenchidos.

## 5.1 Aplicação do Método de Tukey

O estudo estatístico dos dados foi efetuado por meio do método de comparações múltiplas, Tukey, apresentado na Seção 4.1, o qual foi realizado no software estatístico R. O nível de significância adotado foi de 5%. Objetiva-se, por meio desse teste, definir a diferença significativa dos dados, baseada nas médias encontradas para a tensão última das amostras, de acordo com as diferentes configurações.

Para facilitar e possibilitar a aplicação do teste de Tukey, considerou-se a mesma quantidade de observações para todas as amostras, sendo necessário em alguns casos (quando já haviam sido descartadas algumas leituras em função da ruptura fora da área útil), desconsiderar uma leitura. A escolha de qual leitura descartar foi definida aleatoriamente com o auxílio do programa excel, de modo a evitar a tendenciosidade no resultado.

O intuito principal desta aplicação, foi testar se o tipo e/ou porcentagem de preenchimento exerce influência na resistência à tração dos componentes impressos, sendo consideradas as seguintes hipóteses:

- $H_0$ : todas as médias são iguais;
- $H_1$ : ao menos uma das médias é diferente.

A hipótese  $H_0$  admite que ambas as configurações ocasionam em um desempenho equivalente, isto é, a variabilidade na porcentagem de preenchimento não interfere no resultado final. Por outro lado, a hipótese  $H_1$  implica que o percentual de preenchimento influencia na resistência à tração do objeto impresso, indicando que existe diferença significativa entre as médias das tensões últimas.

A aplicação do teste de tukey, no R, ao conjunto de dados, retorna os seguintes valores:

- *diff*: corresponde à diferença entre as médias  $\mu_i$  e  $\mu_j$  do conjunto;
- *lwr* e *upr*: consistem nos limitantes inferior e superior do intervalo de confiança, ou seja, eles indicam o menor e o maior intervalo o qual as médias podem atingir. São definidos pelas expressões: *menor*=*diff* - *TSD* e *maior*=*diff* + *TSD*. Quando tais valores apresentam sinais iguais, as médias possuem diferença significativa;
- *p adj*: equivale ao nível de significância entre os tipos de preenchimento. Do ponto de vista estatístico, se *p adj* <  $\alpha$ , rejeita-se a hipótese  $H_0$  e aceita-se a hipótese  $H_1$ , logo, as médias apresentam diferença significativa. Caso contrário, quando *p adj* >  $\alpha$ , não há evidências suficientes para rejeitar  $H_0$ , indicando que as médias têm 100. (*p adj*) % de chance de serem iguais.

A análise estatística dos resultados visa viabilizar a redução de matéria-prima e o peso dos objetos impressos, por meio do decréscimo do percentual de preenchimento da peça. Dessa forma, partindo-se da concepção de que o termoplástico escolhido, o ângulo e a forma de preenchimento são os mais adequados para a construção do objeto, deseja-se avaliar a viabilidade do uso de peças parcialmente preenchidas.

O método de Tukey foi então aplicado às respostas encontradas, investigando diferenças significativas entre as médias das tensões últimas obtidas para cada configuração estudada. À vista disso, verificou-se diferenças significativas entre as médias alcançadas por amostras preenchidas por completo, e as amostras com 75%, 50% e 25% de preenchimento.

O estudo que segue, corresponde aos resultados conquistados no emprego do método de comparação múltiplas Tukey, para as amostras confeccionadas em PLA.

a) Forma de preenchimento: Retilinear;

As Figuras 5.5 e 5.6 são referentes a análise do método de Tukey para o preenchimento retilinear e ângulo de 0°. Os fatores C1, C3, C5 e C7, correspondem aos percentuais de preenchimento 100%, 75%, 50% e 25% respectivamente. O teste apresentou diferença significativa entre as médias das quatro configurações, evidenciando conseqüentemente que a resistência mecânica dos modelos são afetados pela redução na porcentagem de preenchimento.

Verifica-se pela Figura 5.5 que os limites inferior (*lwr*) e superior (*upr*) possuem o mesmo sinal. Além disso, os *p adj* de todos os pares analisados foram inferiores à  $\alpha$ , consequentemente a hipótese  $H_0$  é rejeita.

Figura 5.5 – Resultados do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 0° (Retilinear).

```

Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

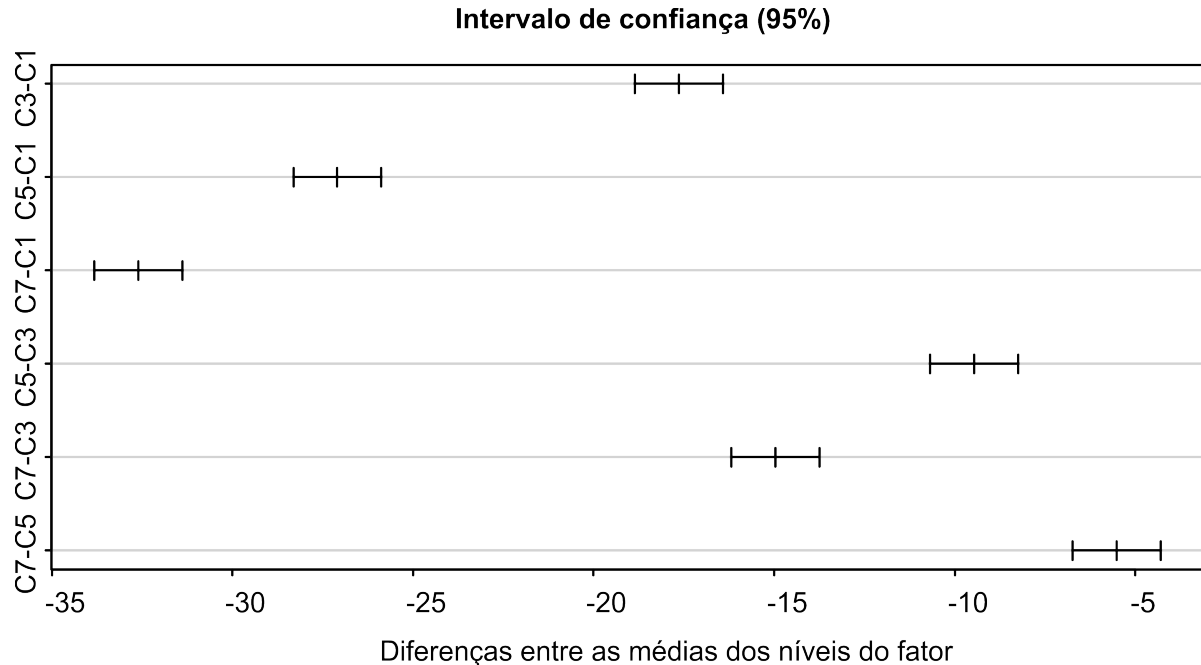
Fit: aov(formula = dados$Tensao ~ dados$Tipo)

`dados$Tipo`
      diff      lwr      upr p adj
C3-C1 -17.634655 -18.85522 -16.414087 0e+00
C5-C1 -27.092570 -28.31314 -25.872002 0e+00
C7-C1 -32.603473 -33.82404 -31.382905 0e+00
C5-C3  -9.457915 -10.67848  -8.237347 0e+00
C7-C3 -14.968818 -16.18939 -13.748250 0e+00
C7-C5  -5.510902  -6.73147  -4.290335 1e-07

```

Fonte: A autora.

Figura 5.6 – Gráfico do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 0° (Retilinear).



Fonte: A autora.

As Figuras 5.7 e 5.8 correspondem aos resultados alcançados pelo método de Tukey para o preenchimento retilinear e ângulo de 45°. Os fatores C2, C4, C6 e C8, são equivalentes aos percentuais de preenchimento 100%, 75%, 50% e 25% respectivamente. O método expôs nesse caso, também haver diferença significativa entre as médias das quatro configurações,

indicando igualmente haver depreciação da resistência mecânica dos modelos, quando reduzido suas taxas percentuais de preenchimento.

Figura 5.7 – Resultados do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 45° (Retilinear).

```

Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

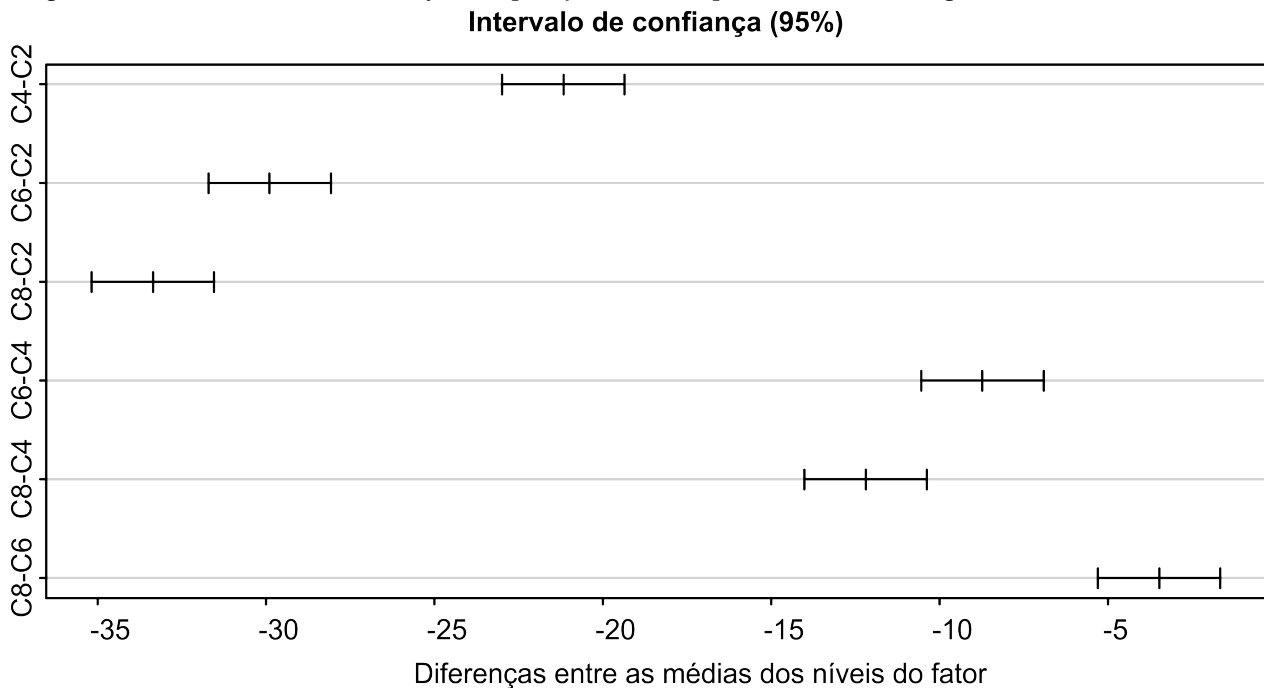
Fit: aov(formula = dados$Tensao ~ dados$Tipo)

$`dados$Tipo`
      diff      lwr      upr    p adj
C4-C2 -21.166320 -22.98383 -19.348815 0.0000000
C6-C2 -29.888818 -31.70632 -28.071312 0.0000000
C8-C2 -33.360973 -35.17848 -31.543467 0.0000000
C6-C4  -8.722498 -10.54000  -6.904992 0.0000000
C8-C4 -12.194653 -14.01216 -10.377147 0.0000000
C8-C6  -3.472155  -5.28966  -1.654650 0.0005191

```

Fonte: A autora.

Figura 5.8 – Gráfico do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 45° (Retilinear).



Fonte: A autora.

Percebe-se, tal como no caso anterior, que os limites inferior (*lwr*) e superior (*upr*) possuem o mesmo sinal e que os *p adj* dos pares analisados foram inferiores à  $\alpha$ .

b) Forma de preenchimento: Colméia;

As Figuras 5.9 e 5.10 expõem os resultados do método estatístico para o preenchimento colméia e ângulo de 0°. Os fatores C9, C11 e C13, correspondem aos percentuais de preenchimento 75%, 50% e 25%, nesta ordem.

Figura 5.9 – Resultados do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 0° (Colméia).

```

Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

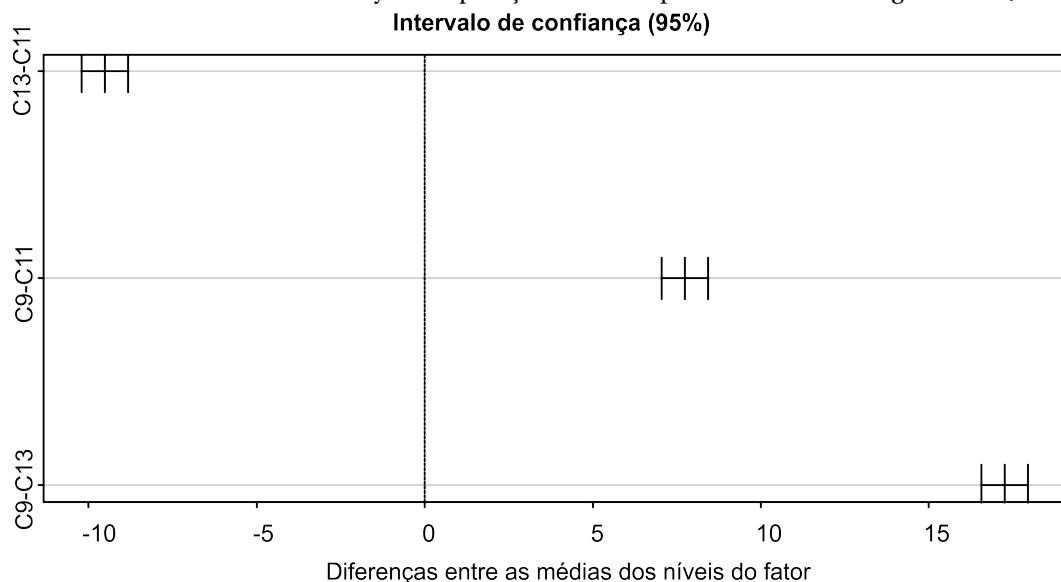
Fit: aov(formula = dados$Tensao ~ dados$Tipo)

$`dados$Tipo`
      diff      lwr      upr p adj
C13-C11 -9.513750 -10.208970 -8.818530  0
C9-C11  7.744865  7.049645  8.440085  0
C9-C13 17.258615 16.563395 17.953835  0

```

Fonte: A autora.

Figura 5.10 – Gráfico do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 0° (Colméia).

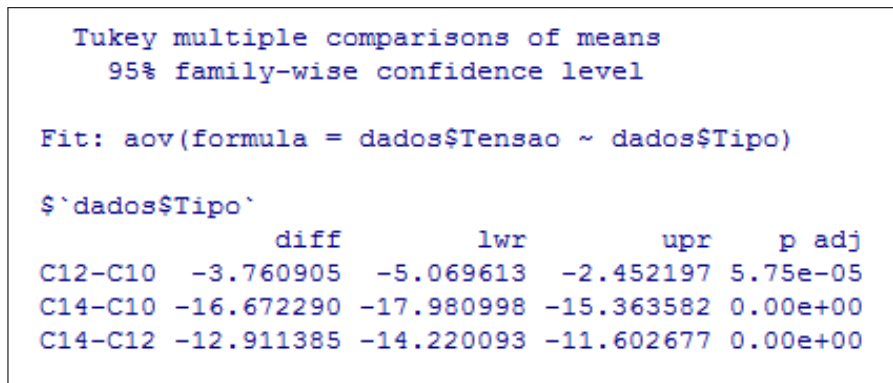


Fonte: A autora.

Conforme pode ser visualizado na Figura 5.9, o método apresentou diferença significativa entre as médias das três configurações comparadas, constatando haver perda da resistência mecânica dos componentes, quando se reduz suas taxas percentuais de preenchimento. O mesmo ocorre para as amostras com preenchimento colméia e ângulo de 45°, conforme pode ser verificado nos resultados expostos nas Figuras 5.11.

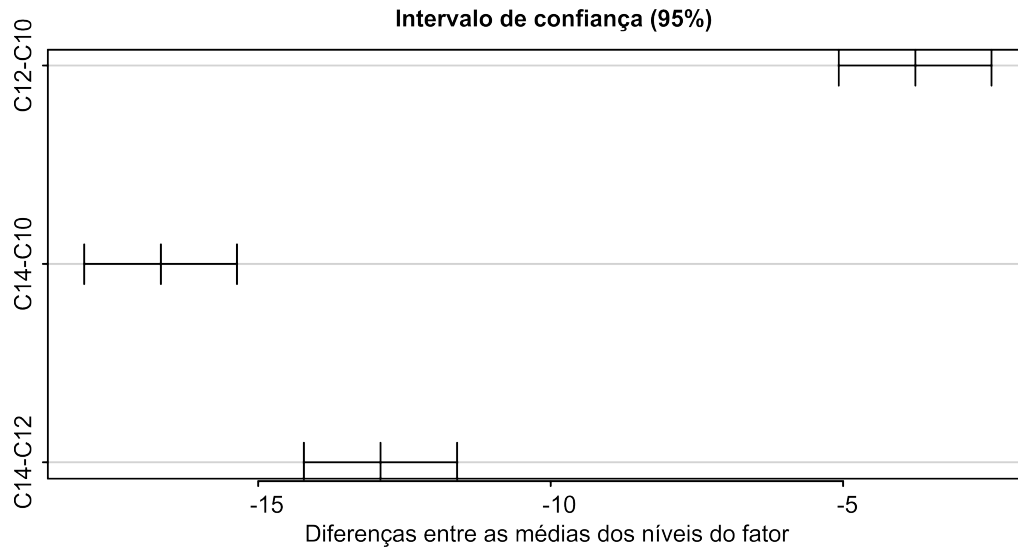
As Figuras 5.11 e 5.12 mostram a análise de Tukey com o preenchimento colméia e ângulo de 45°. Os fatores C10, C12 e C14, representam os percentuais de preenchimento 75%, 50% e 25%, respectivamente.

Figura 5.11 – Resultados do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 45° (Colméia).



Fonte: A autora.

Figura 5.12 – Gráfico do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 45° (Colméia).



Fonte: A autora.

c) Forma de preenchimento: Linear;

As Figuras 5.13 e 5.14 apresentam a análise do teste de Tukey com o preenchimento linear e ângulo de 0°. Os fatores C15, C17 e C19, representam os percentuais de preenchimento 75%, 50% e 25%, respectivamente.

Figura 5.13 – Resultados do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 0° (Linear).

```

Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

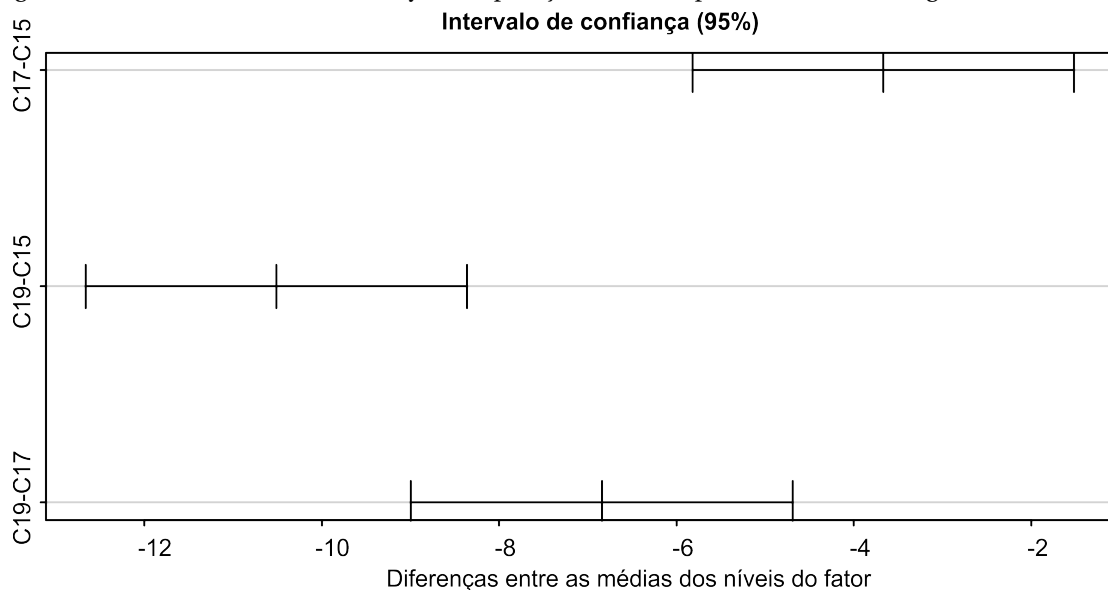
Fit: aov(formula = dados$Tensao ~ dados$Tipo)

$`dados$Tipo`
      diff      lwr      upr    p adj
C17-C15 -3.667640 -5.818207 -1.517073 0.0026461
C19-C15 -10.509723 -12.660289 -8.359156 0.0000007
C19-C17 -6.842082 -8.992649 -4.691516 0.0000253

```

Fonte: A autora.

Figura 5.14 – Gráfico do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 0° (Linear).



Fonte: A autora.

Vê-se em ambos os casos (ângulo 0° e 45°), que o método de Tukey indicou haver diferença significativa entre as médias das configurações avaliadas, mostrando que a resistência mecânica dos modelos, sofre uma redução expressiva quando os percentuais de preenchimento são diminuídos.

As Figuras 5.15 e 5.16 exibem os resultados obtidos pelo método de Tukey para o preenchimento linear e ângulo de 45°. Os fatores C16, C18 e C20, representam os percentuais de preenchimento 75%, 50% e 25%, respectivamente.

Figura 5.15 – Resultados do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 45° (Linear).

```

Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

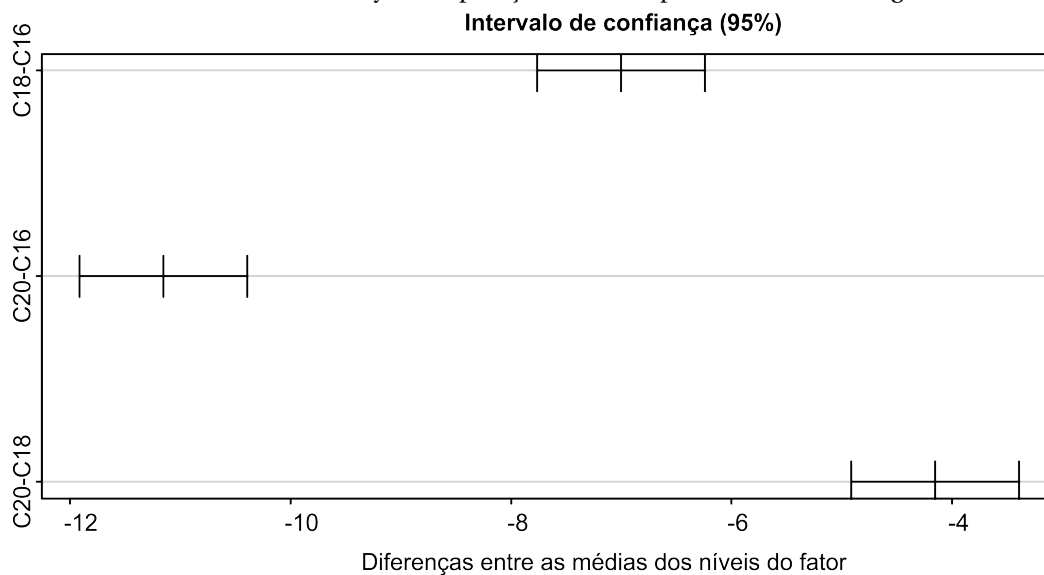
Fit: aov(formula = dados$Tensao ~ dados$Tipo)

$dados$Tipo`
      diff      lwr      upr p adj
C18-C16 -7.000350 -7.761310 -6.239390 0e+00
C20-C16 -11.152155 -11.913115 -10.391195 0e+00
C20-C18  -4.151805  -4.912765  -3.390845 3e-07

```

Fonte: A autora.

Figura 5.16 – Gráfico do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 45° (Linear).



Fonte: A autora.

Uma análise estatística análoga foi realizada para o termoplástico ABS. Os resultados encontrados são apresentados nos casos que seguem.

a) Forma de preenchimento: Retilinear;

As Figuras 5.17 e 5.18 apresentam o resultado do método de Tukey para amostras com o preenchimento retilinear e ângulo de 0°. Os fatores C1, C3, C5 e C7, são relativas aos percentuais de preenchimento 100%, 75%, 50% e 25%, nessa ordem.

Figura 5.17 – Resultados do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 0° (Retilinear).

```

Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

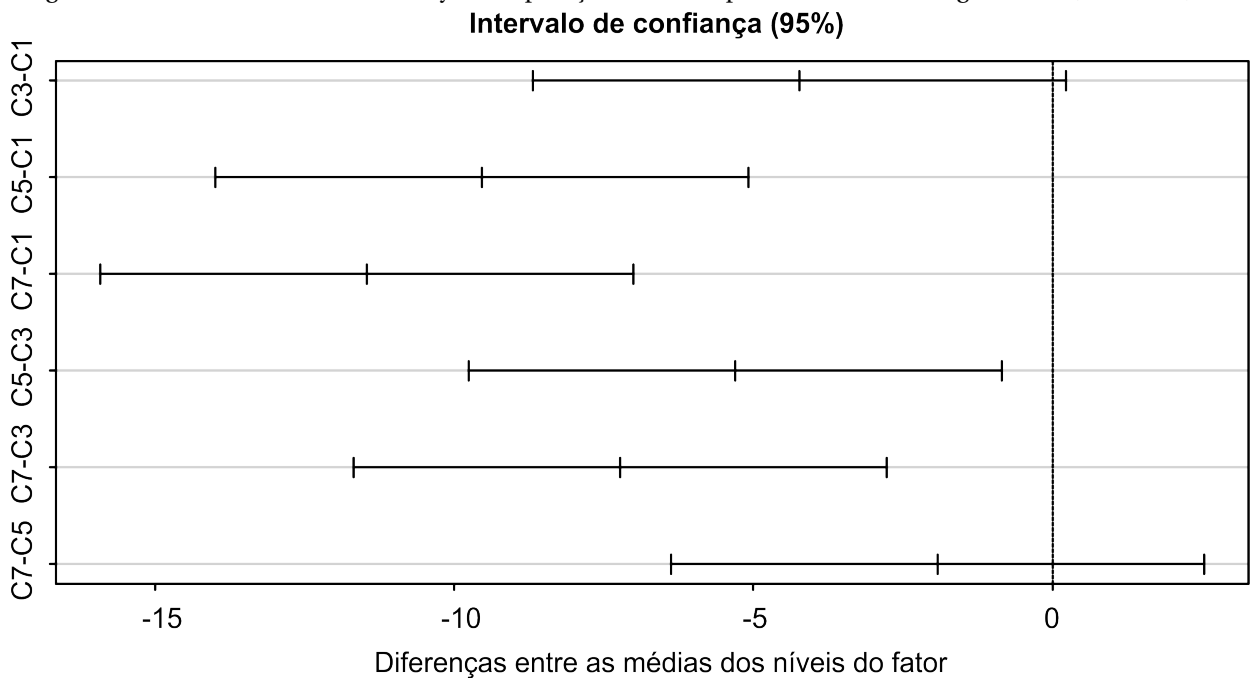
Fit: aov(formula = dados$Tensao ~ dados$Tipo)

`dados$Tipo`
      diff      lwr      upr    p adj
C3-C1 -4.235485 -8.690088  0.2191176 0.0642528
C5-C1 -9.541595 -13.996198 -5.0869924 0.0001835
C7-C1 -11.459235 -15.913838 -7.0046324 0.0000311
C5-C3 -5.306110 -9.760713 -0.8515074 0.0185705
C7-C3 -7.223750 -11.678353 -2.7691474 0.0020644
C7-C5 -1.917640 -6.372243  2.5369626 0.5927983

```

Fonte: A autora.

Figura 5.18 – Gráfico do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 0° (Retilinear).



Fonte: A autora.

O teste indicou não haver diferença significativa entre as médias das tensões últimas das configurações 100% e 75%, e entre 50% e 25%. O par 100%-75% exibiu um *diff* de -4.23549 e um *p adj* de 0.06425, ao passo que o par 50%-25% expôs um *diff* de -1.91764 e um *p adj* de 0.59280. Observa-se em ambos os casos que o valor de *p adj* foi superior ao nível de confiança adotado.

Percebe-se que é possível minimizar o peso dos modelos impressos, reduzindo 25% da taxa de preenchimento do mesmo, sem perda significativa da resistência à tração, para o caso em que é empregado o polímero ABS, preenchimento retilinear a um ângulo 0°.

As Figuras 5.19 e 5.20 são relativas à aplicação do método de Tukey para o preenchimento retilinear e ângulo de 45°. Os fatores C2, C4, C6 e C8, referem-se aos percentuais de preenchimento 100%, 75%, 50% e 25% respectivamente.

Figura 5.19 – Resultados do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 45° (Retilinear).

```

Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

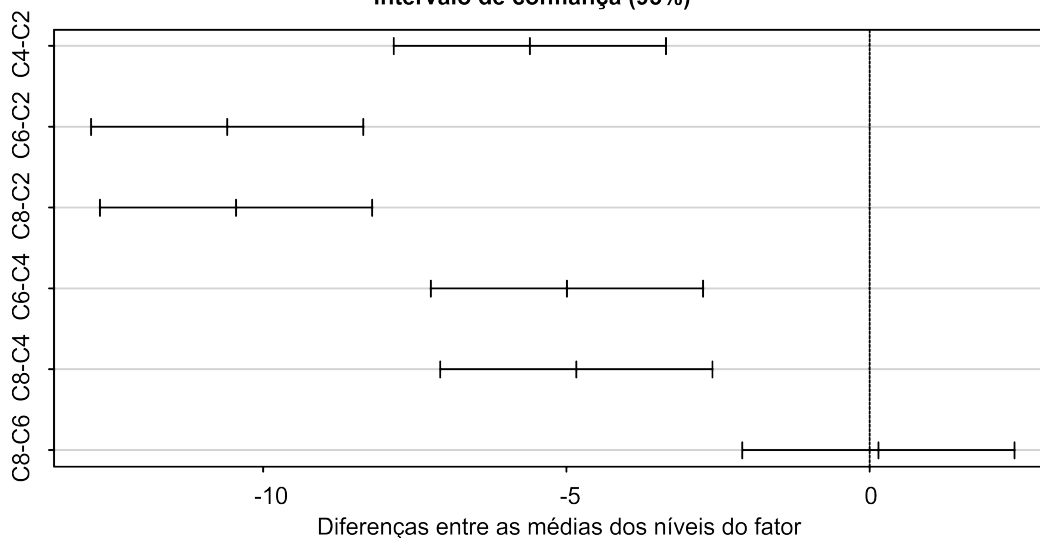
Fit: aov(formula = dados$Tensao ~ dados$Tipo)

$`dados$Tipo`
      diff      lwr      upr    p adj
C4-C2 -5.6039600 -7.848761 -3.359159 0.0000420
C6-C2 -10.5934725 -12.838274 -8.348671 0.0000000
C8-C2 -10.4445150 -12.689316 -8.199714 0.0000001
C6-C4 -4.9895125 -7.234314 -2.744711 0.0001296
C8-C4 -4.8405550 -7.085356 -2.595754 0.0001724
C8-C6  0.1489575 -2.095844  2.393759 0.9971385

```

Fonte: A autora.

Figura 5.20 – Gráfico do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 45° (Retilinear).  
Intervalo de confiança (95%)



Fonte: A autora.

O teste apontou que as médias das tensões últimas encontradas para as configurações com 50% e 25% não possuem diferença significativa. Tais médias retornaram um *diff* de 0.14896 e um *p adj* de 0.99714.

Tal resultado, evidencia a possibilidade de reduzir 25% da taxa de preenchimento, sem perdas consideráveis no desempenho mecânico dos componentes impressos, para o caso cuja configuração corresponde ao uso do material ABS, preenchimento retilinear a um ângulo 45°.

b) Forma de preenchimento: Colméia;

As Figuras 5.21 e 5.22 expõem a análise de Tukey para o preenchimento colméia e ângulo de 0°. Os fatores C9, C11 e C13, correspondem aos percentuais de preenchimento 75%, 50% e 25%, nesta ordem.

Com base na Figura 5.21, observa-se que os limites inferior (*lwr*) e superior (*upr*) possuem sinais iguais. Ademais, os *p adj* dos pares investigados foram inferiores ao nível de confiança de 5%, por consequência a hipótese  $H_0$  é rejeitada.

Figura 5.21 – Resultados do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 0° (Colméia).

```

Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

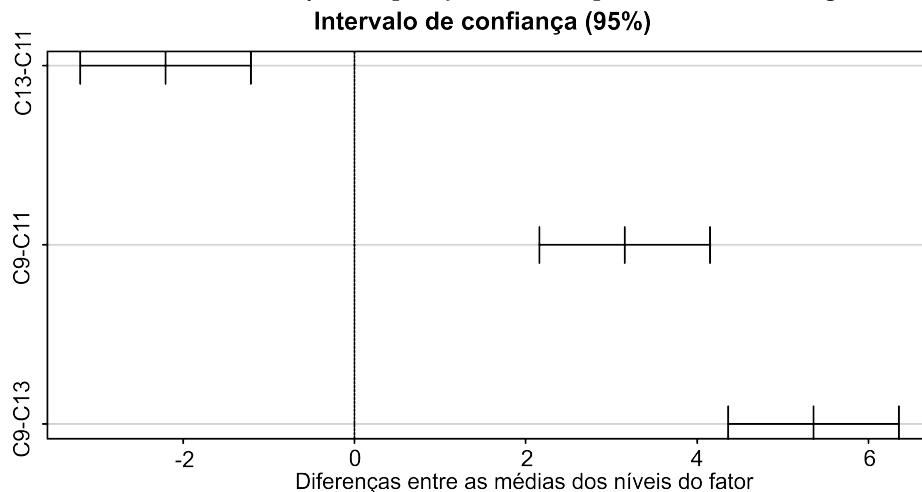
Fit: aov(formula = dados$Tensao ~ dados$Tipo)

$`dados$Tipo`
      diff      lwr      upr    p adj
C13-C11 -2.206183 -3.202389 -1.209976 0.0004257
C9-C11   3.155625  2.159419  4.151831 0.0000263
C9-C13   5.361808  4.365601  6.358014 0.0000003

```

Fonte: A autora.

Figura 5.22 – Gráfico do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 0° (Colméia).



Fonte: A autora.

A Figura 5.23 e 5.24 expõem a análise de Tukey para o preenchimento colméia e ângulo de 45°. Os fatores C9, C11 e C13, correspondem aos percentuais de preenchimento 75%, 50% e 25%, nesta ordem.

Por intermédio da Figura 5.23, percebe-se que a hipótese  $H_0$  é rejeitada, indicando haver diferença significativa entre as médias das tensões últimas dos modelos com 25%, 50% e 75% de preenchimento. Isto indica, que a redução dos níveis de preenchimento do componente acarreta também na redução significativa da resistência à tração do objeto impresso.

Figura 5.23 – Resultados do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 45° (Colméia).

```

Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

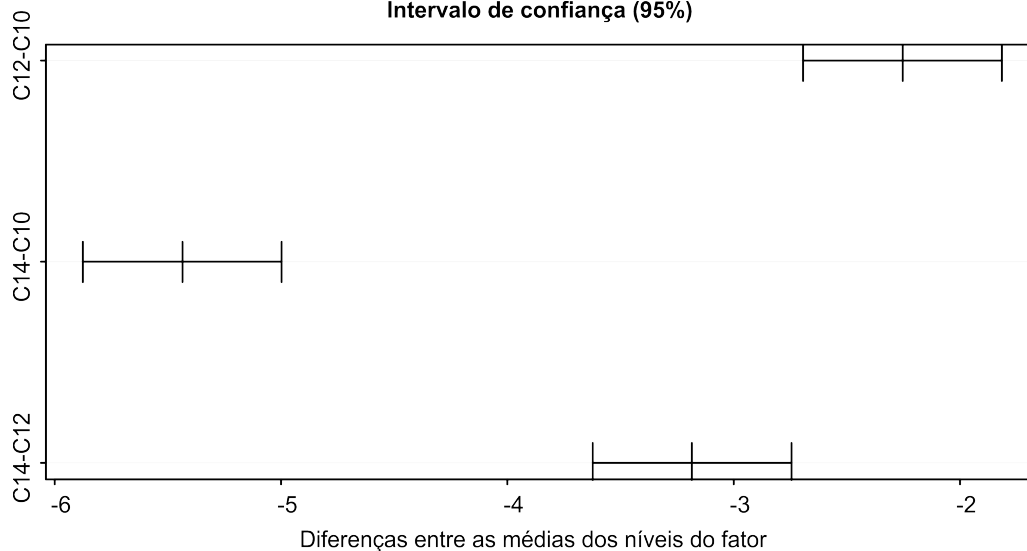
Fit: aov(formula = dados$Tensao ~ dados$Tipo)

 `$dados$Tipo`
      diff      lwr      upr p adj
C12-C10 -2.252778 -2.692728 -1.812827 5e-07
C14-C10 -5.436318 -5.876268 -4.996367 0e+00
C14-C12 -3.183540 -3.623490 -2.743590 0e+00

```

Fonte: A autora.

Figura 5.24 – Gráfico do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 45° (Colméia).  
Intervalo de confiança (95%)



Fonte: A autora.

c) Forma de preenchimento: Linear;

Os resultados da aplicação do método de Tukey às amostras com preenchimento linear e ângulo de 0°, são exibidas nas Figuras 5.25 e 5.26. Os fatores C15, C17 e C19, são

relativos aos percentuais de preenchimento 75%, 50% e 25%, respectivamente.

A análise de Tukey revelou não haver diferença significativa entre as médias das tensões últimas encontradas para as configurações com 75% e 50%. Tais médias retornaram um *diff* de -1.05194 e um *p adj* de 0.50394. Isso comprova que é possível minimizar o peso do objeto, confeccionado com essa configuração, em até 25%.

Figura 5.25 – Resultados do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 0° (Linear).

```

Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

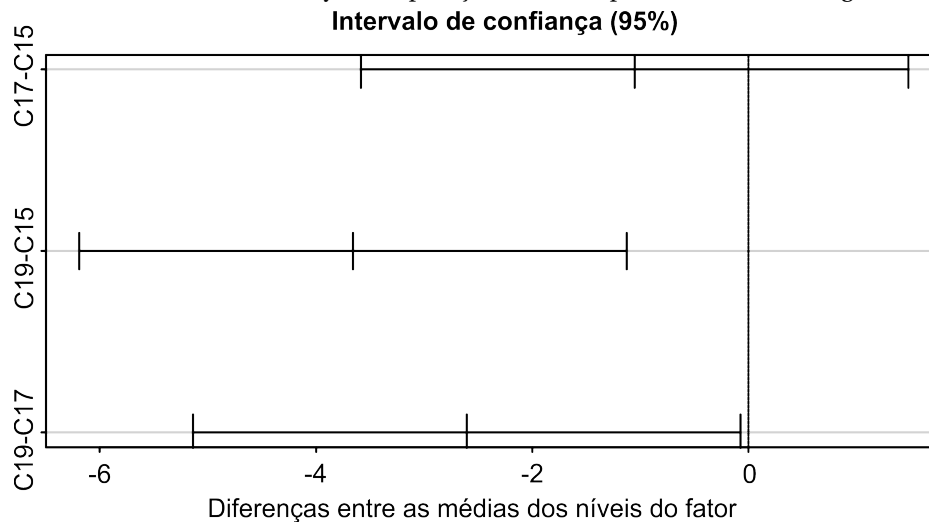
Fit: aov(formula = dados$Tensao ~ dados$Tipo)

$`dados$Tipo`
      diff      lwr      upr    p adj
C17-C15 -1.05194 -3.582979  1.47908855 0.5039449
C19-C15 -3.658470 -6.189504 -1.12743645 0.0074584
C19-C17 -2.606525 -5.137559 -0.07549145 0.0439087

```

Fonte: A autora.

Figura 5.26 – Gráfico do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 0° (Linear).



Fonte: A autora.

Finalmente, o resultado do método de Tukey para a configuração com preenchimento linear e ângulo de 45°, são exibidas nas Figuras 5.27 e 5.28. Os fatores C16, C18 e C20, são referentes aos percentuais de preenchimento 75%, 50% e 25%, por essa ordem.

Figura 5.27 – Resultados do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 45° (Linear).

```

Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

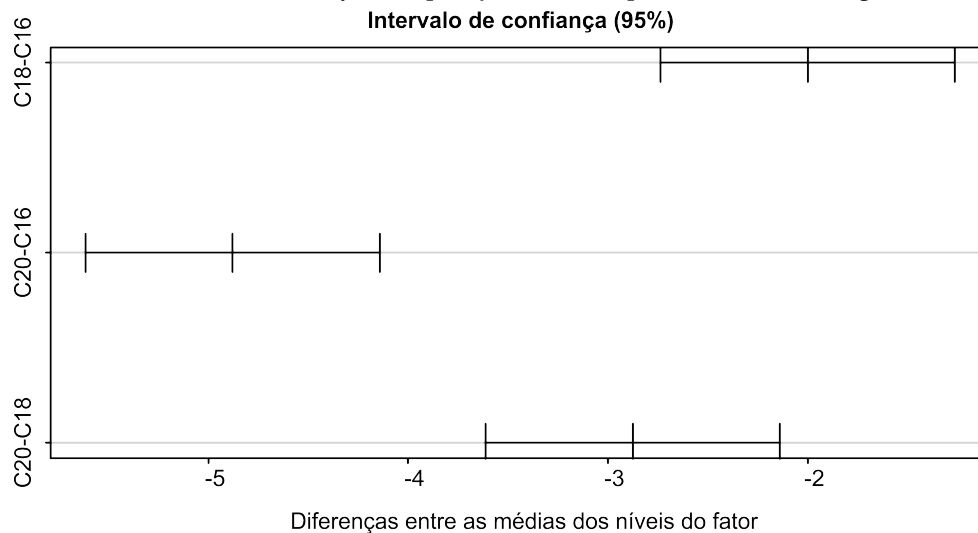
Fit: aov(formula = dados$Tensao ~ dados$Tipo)

$`dados$Tipo`
      diff      lwr      upr    p adj
C18-C16 -2.001320 -2.736932 -1.265708 8.86e-05
C20-C16 -4.877775 -5.613387 -4.142163 0.00e+00
C20-C18 -2.876455 -3.612067 -2.140843 4.60e-06

```

Fonte: A autora.

Figura 5.28 – Gráfico do Teste de Tukey - Comparação amostras preenchidas a um ângulo de 45° (Linear).



Fonte: A autora.

De acordo com a Figura 5.25, vê-se que todas as comparações pareadas, apresentam diferença significativa. Dessa forma, verifica-se que a redução nas taxas de preenchimento do objeto, para essa configuração, influenciam diretamente na resistência à tração do modelo impresso, havendo perda do desempenho mecânico do componente conforme se reduz seu preenchimento.

## 5.2 Modelo de Predição da Resistência à Tração de Componentes Impressos com Termoplásticos PLA e ABS

Os parâmetros de processo: forma, porcentagem e ângulo de preenchimento, e a resposta de tração obtidos por intermédio dos modelos testados, foram submetidos ao sistema do *software* R, objetivando desenvolver um modelo de predição que relacione a resistência à tração dos componentes impressos aos parâmetros em estudo.

Os modelos criados levam em consideração o ângulo ( $\theta$ ) e a porcentagem de preenchimento ( $P$ ) do objeto, a partir da determinação prévia do tipo de material e da forma de preenchimento. Dessa forma, a partir da seleção do material e de um padrão de preenchimento (de preferência ou mais adequado a geometria do objeto), é possível definir qual ângulo e porcentagem de preenchimento, propiciam maior resistência à tração ou ao menos uma resistência satisfatória, de acordo com a aplicação a que será sujeita.

Para a construção de cada modelo, foi utilizada a função *lm* do *software* R, capaz de criar modelos de regressão não lineares, lineares simples e múltipla. Ao total foram criados 6 modelos com termos não lineares, três para cada tipo de material, conforme as formas de preenchimento.

Para o termoplástico PLA foram criados os modelos dados pelas Eq. (5.1), (5.2) e (5.3), referentes aos preenchimentos colméia, linear e retilinear respectivamente, utilizados para a predição da tensão última média dos parâmetros estudados.

A eficiência e viabilidade de um bom modelo de regressão reside primeiramente, na capacidade do modelo ajustado em explicar as variações no conjunto de dados. Um ferramenta estatística geralmente empregada para determinar o nível de adequação do modelo construído consiste no coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e sua versão ajustada ( $R^2$  ajustado). Eles são tomados como medida sumária fornecendo um parâmetro de adequabilidade do modelo ajustado, contribuindo inclusive de forma decisória para a adoção de modelos de regressão (CHENG; GARG *et al.*, 2014; KURZ-KIM; LORETAN, 2014).

Afim de demonstrar a eficiência dos modelos, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$  ajustado) serão apresentados, além disso o nível de significância de cada variável regressora também será exposto de forma a fornecer informações sobre a relevância dos termos considerados no modelo. Ainda, o programa R não foi capaz de realizar uma aproximação para o termo quadrático da variável ângulo, dessa forma esta parcela não foi considerada para a modelagem.

- Material: PLA

- a) Preenchimento: colméia.

$$\sigma = 8.4261733 + 0.7819469P + 0.0197877\theta - 0.0043677P^2 - 0.000266P\theta \quad (5.1)$$

A análise estatística do modelo reportou um valor de 0.9809 para o coeficiente de determinação e de 0.9769 para o coeficiente de determinação ajustado, conforme Tabela 5.5. Ademais, evidenciou-se que os termos  $\theta$  e  $P\theta$  são irrelevantes para o modelo, ou seja, fornecem uma contribuição sem significância.

Tabela 5.5 – Estatísticas Modelo de Predição da Resistência à Tração do PLA-Colméia.

Variável	Valor
Intercepto	8.4261733***
$P$	0.7819469***
$\theta$	0.0197877
$P^2$	- 0.0043677***
$P\theta$	- 0.000266
$R^2$	0.9809
$R^2 adj$	0.9769
$p - valor$	$4.871 \times 10^{-16}$

\*\*\*Altamente significativo.

b) Preenchimento: linear.

$$\sigma = 20.8255488 + 0.2232303P + 0.0079958\theta - 0.0001304P^2 + 0.0002855P\theta \quad (5.2)$$

Para o modelo linear, foi obtido um valor de 0.9518 para o coeficiente de determinação, para o coeficiente de determinação ajustado foi de 0.9416 (Tabela 5.6). Nesse modelo, foi constatado que os termos  $\theta$ ,  $P\theta$  e  $P^2$  não são significantes para o modelo.

Tabela 5.6 – Estatísticas Modelo de Predição da Resistência à Tração do PLA-Linear.

Variável	Valor
Intercepto	20.8255488***
$P$	0.2232303*
$\theta$	0.0079958
$P^2$	- 0.0001304
$P\theta$	0.0002855
$R^2$	0.9518
$R^2 adj$	0.9416
$p - valor$	$4.871 \times 10^{-16}$

\*\*\*Altamente significativo; \*Significativo a 5% de probabilidade.

c) Preenchimento: retilinear.

$$\sigma = 30.7358859 - 0.3163746P + 0.0119614\theta + 0.0059636P^2 + 0.0001366P\theta \quad (5.3)$$

O coeficiente de determinação para o modelo retilinear em PLA foi de 0.9918, e o coeficiente de determinação ajustado foi de 0.9906 (Tabela 5.7). Os termos  $\theta$  e  $P\theta$  também mostraram não ser significantes para o modelo.

Tabela 5.7 – Estatísticas Modelo de Predição da Resistência à Tração do PLA-Retilinear.

Variável	Valor
Intercepto	30.7358859***
$P$	- 0.3163746***
$\theta$	0.0119614
$P^2$	0.0059636***
$P\theta$	0.0001366
$R^2$	0.9918
$R^2 adj$	0.9906
$p - valor$	$2.2 \times 10^{-16}$

\*\*\*Altamente significativo.

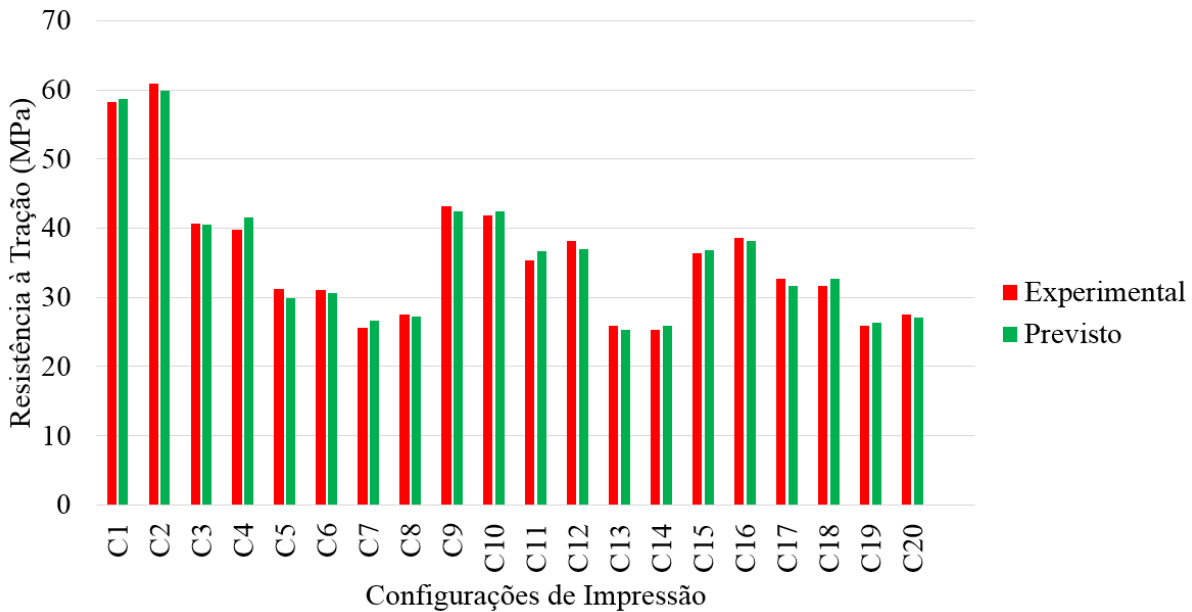
A Tabela 5.8 apresenta os valores previstos pelos modelos, bem como os valores experimentais encontrados pelas amostras testadas e confeccionadas em PLA.

Tabela 5.8 – Resposta do modelo de predição para o termoplástico PLA.

Configuração	Forma	Ângulo	Porcentagem	Experimental	Previsto	Erro absoluto	Erro Relativo
C1	Retilinear	0	100	58,24945	58,73443	0,485	0,008
C3	Retilinear	0	75	40,61479	40,55304	0,062	0,002
C5	Retilinear	0	50	31,15688	29,82616	1,331	0,043
C7	Retilinear	0	25	25,64597	26,55377	0,908	0,035
C9	Colméia	0	75	43,11875	42,50388	0,615	0,014
C11	Colméia	0	50	35,37389	36,60427	1,230	0,035
C13	Colméia	0	25	25,86014	25,24503	0,615	0,024
C15	Linear	0	75	36,33264	36,83432	0,502	0,014
C17	Linear	0	50	32,66500	31,66106	1,004	0,031
C19	Linear	0	25	25,82292	26,32481	0,502	0,019
C2	Retilinear	45	100	60,94333	59,88739	1,056	0,017
C4	Retilinear	45	75	39,77701	41,55233	1,775	0,045
C6	Retilinear	45	50	31,05451	30,67177	0,383	0,012
C8	Retilinear	45	25	27,58236	27,24571	0,337	0,012
C10	Colméia	45	75	41,89944	42,49657	0,597	0,014
C12	Colméia	45	50	38,13854	36,89621	1,242	0,033
C14	Colméia	45	25	25,22715	25,83623	0,609	0,024
C16	Linear	45	75	38,65993	38,15769	0,502	0,013
C18	Linear	45	50	31,65958	32,66325	1,004	0,032
C20	Linear	45	25	27,50778	27,00580	0,502	0,018
<b>Erro Relativo Médio</b>						<b>0,022</b>	

A representação gráfica e comparativa das respostas experimentais e dos valores previstos, é dada pela Figura 5.29.

Figura 5.29 – Resposta da resistência à tração mensurada e prevista (Polímero PLA).



Fonte: A autora.

Para o material ABS foram criados os modelos apresentados pelas Eq. (5.4), (5.5) e (5.6), que diz respeito aos preenchimentos colméia, linear e retilinear respectivamente, usados para a previsão da tensão última média dos parâmetros analisados nesse estudo.

- Material: ABS

- a) Preenchimento: colméia.

$$\sigma = 13.05 + 0.1065P + 0.003239\theta + 0.000007472P^2 + 0.00003312P\theta \quad (5.4)$$

O modelo colméia para o ABS revelou os seguintes resultados:  $R^2 = 0.9676$ ,  $R^2$  ajustado = 0.9608 (Tabela 5.9). Verificou-se que os termos  $\theta$ ,  $P\theta$  e  $P^2$  não são significantes para o modelo.

Tabela 5.9 – Estatísticas Modelo de Predição da Resistência à Tração do ABS-Colméia.

Variável	Valor
Intercepto	13.05***
$P$	0.1065**
$\theta$	0.003239
$P^2$	0.000007472
$P\theta$	0.00003312
$R^2$	0.9676
$R^2$ adj	0.9608
$p$ -valor	$7.264 \times 10^{-14}$

\*\*\*Altamente significativo; \*\*Significativo a 1% de probabilidade.

b) Preenchimento: linear.

$$\sigma = 10.8710742 + 0.170358P - 0.013373\theta - 0.0009719P^2 + 0.0005419P\theta \quad (5.5)$$

Para o modelo linear, obteve-se:  $R^2 = 0.8292$ ,  $R^2$  ajustado = 0.7932 (Tabela 5.10). Os termos  $\theta$ ,  $P\theta$  e  $P^2$  não apresentam significância para o modelo.

Tabela 5.10 – Estatísticas Modelo de Predição da Resistência à Tração do ABS-Linear.

Variável	Valor
Intercepto	10.8710742***
$P$	0.170358*
$\theta$	- 0.013373
$P^2$	- 0.0009719
$P\theta$	0.0005419
$R^2$	0.8292
$R^2$ adj	0.7932
$p$ – valor	$4.546 \times 10^{-7}$

\*\*\*Altamente significativo; \*Significativo a 5% de probabilidade.

c) Preenchimento: retilinear.

$$\sigma = 14.6649566 - 0.0430338P + 0.0131381\theta + 0.0016142P^2 - 0.0002987P\theta \quad (5.6)$$

Por fim, para o modelo retilinear, foram encontradas as seguintes estatísticas:  $R^2 = 0.8822$ ,  $R^2$  ajustado = 0.8647 (Tabela 5.11). Nesse caso, os termos  $P$ ,  $\theta$  e  $P\theta$  não foram significantes para o modelo.

Tabela 5.11 – Estatísticas Modelo de Predição da Resistência à Tração do ABS-Retilinear.

Variável	Valor
Intercepto	14.6649566***
$P$	- 0.0430338
$\theta$	0.0131381
$P^2$	0.0016142**
$P\theta$	- 0.0002987
$R^2$	0.8292
$R^2$ adj	0.7932
$p$ – valor	$3.735 \times 10^{-12}$

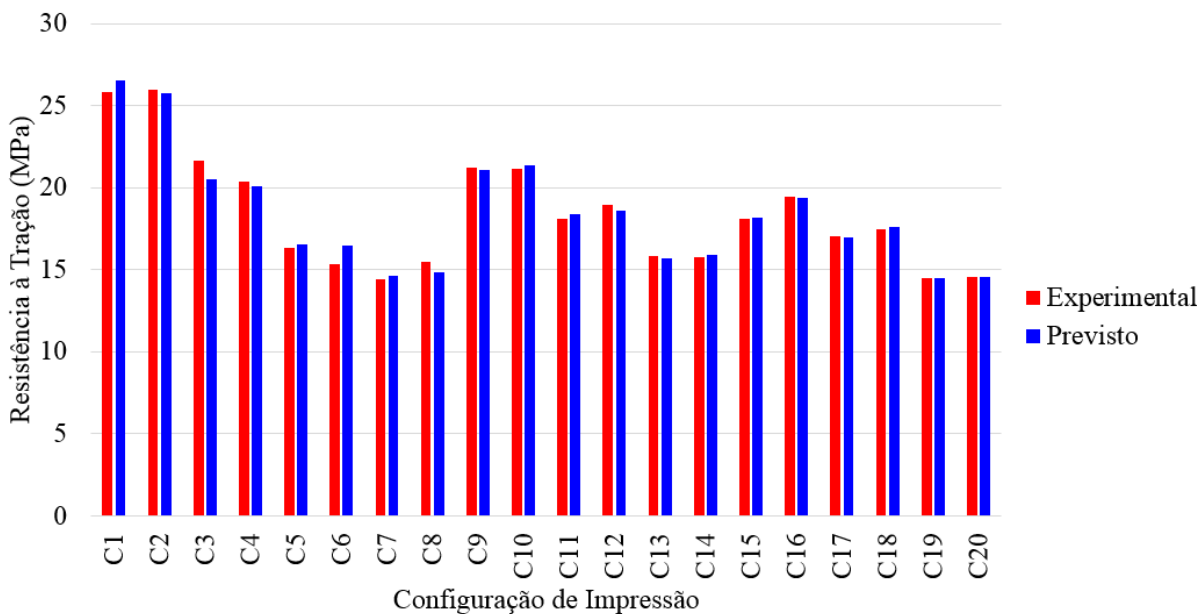
\*\*\*Altamente significativo; \*Significativo a 5% de probabilidade.

Os valores presumidos pelos modelos matemáticos, assim como os valores encontrados através dos ensaios experimentais em componentes confeccionados em ABS, são exibidos na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Resposta do modelo de predição para o termoplástico ABS.

Configuração	Forma	Ângulo	Porcentagem	Experimental	Previsto	Erro absoluto	Erro Relativo
C1	Retilinear	0	100	25,85076	26,50358	0,653	0,025
C3	Retilinear	0	75	21,61528	20,51730	1,098	0,051
C5	Retilinear	0	50	16,30917	16,54877	0,240	0,015
C7	Retilinear	0	25	14,39153	14,59799	0,206	0,014
C9	Colméia	0	75	21,23354	21,07953	0,154	0,007
C11	Colméia	0	50	18,07792	18,39368	0,316	0,017
C13	Colméia	0	25	15,87174	15,71717	0,155	0,010
C15	Linear	0	75	18,12444	18,18099	0,057	0,003
C17	Linear	0	50	17,07250	16,95922	0,113	0,007
C19	Linear	0	25	14,46597	14,52259	0,057	0,004
C2	Retilinear	45	100	25,95319	25,75064	0,203	0,008
C4	Retilinear	45	75	20,34924	20,10040	0,249	0,012
C6	Retilinear	45	50	15,35972	16,46791	1,108	0,072
C8	Retilinear	45	25	15,50868	14,85316	0,656	0,042
C10	Colméia	45	75	21,17771	21,33707	0,159	0,008
C12	Colméia	45	50	18,92493	18,61396	0,311	0,016
C14	Colméia	45	25	15,74139	15,90019	0,159	0,010
C16	Linear	45	75	19,46486	19,40811	0,057	0,003
C18	Linear	45	50	17,46354	17,57671	0,113	0,006
C20	Linear	45	25	14,58708	14,53044	0,057	0,004
<b>Erro Relativo Médio</b>						<b>0,017</b>	

Figura 5.30 – Resposta da resistência à tração mensurada e prevista (Polímero ABS).



Fonte: A autora.

A Figura 5.30 mostra de forma gráfica, os valores mensurados experimentalmente e os previstos pelos modelos.

De maneira geral, os modelos mostraram ser utilizáveis fornecendo resultados coerentes com bons valores para os coeficientes de determinação, contudo tais modelos indicaram necessidades de melhorias, de forma a garantir mais eficiência e eficácia.

Em todos os casos, a análise estatística revelou que a variável ângulo não é relevante, não fornecendo contribuição significativa para a aproximação da tensão última dos componentes impressos. Por consequência disso, optou-se por realizar a simplificação dos modelos matemáticos criados.

### 5.3 Simplificação dos Modelos de Predição da Resistência à Tração de Componentes Impressos em Termoplásticos PLA e ABS

Visando a composição de modelos matemáticos efetivos e eficientes, foi empregado o método dos coeficientes de correlação de Pearson. Do ponto de vista estatístico, tal método, possui o intuito de verificar uma possível associação linear entre duas variáveis (MUKAKA, 2012). Esse método foi aplicado aos dados das tensões últimas obtidas para cada configuração, de modo a confirmar a inexistência da correlação entre as variáveis ângulo e tensão última média. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.14.

Basicamente, o coeficiente de correlação de Pearson ( $\rho$ ) é uma grandeza adimensional que mensura o grau de associação linear bidirecional entre duas variáveis, e assume qualquer valor no intervalo -1 a +1. A inexistência de uma relação linear entre duas variáveis contínuas é indicada por um coeficiente de correlação zero, ao passo que um coeficiente de correlação de  $\pm 1$  exprime a existência de uma relação linear perfeita. Quanto mais forte for a correlação entre as variáveis, mais próximo de  $\pm 1$  será o coeficiente de Pearson. Valores positivos para o mesmo, indicam que as variáveis estão diretamente relacionadas, enquanto valores negativos são indicativo de variáveis inversamente relacionadas (MUKAKA, 2012).

A Tabela 5.13 exhibe as regras de interpretação para o coeficiente de correlação de Pearson.

- $\rho = 1$ : Existe uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis, em outras palavras, conforme o valor de uma variável aumenta, a outra também é aumentada consequentemente.
- $\rho = 0$ : Não existe relação entre as variáveis, ou seja, elas não dependem linearmente uma da outra.

- $\rho = -1$ : Existe uma correlação perfeita negativa entre as duas variáveis, isto é, à medida que o valor de uma variável cresce, o valor da outra tende a reduzir.

Tabela 5.13 – Regra de interpretação do grau de correlação do coeficiente de Pearson.

Grau de correlação	Interpretação
0.90 a 1.00 (-0.90 a -1.00)	Correlação positiva (negativa) muito alta
0.70 a 0.90 (-0.70 a -0.90)	Correlação positiva (negativa) alta
0.50 a 0.70 (-0.50 a -0.70)	Correlação positiva (negativa) moderada
0.30 a 0.50 (-0.30 a -0.50)	Correlação positiva (negativa) baixa
0.00 a 0.30 (0.00 a -0.30)	Correlação positiva (negativa) desprezível

Fonte: Adaptado de (MUKAKA, 2012).

Os valores encontrados para os coeficientes de correlação considerando cada configuração são apresentados na Tabela 5.14:

Tabela 5.14 – Resultado do coeficiente de Pearson para as configurações estudadas.

Material	Preenchimento	Variáveis	Coefficiente $\rho$
ABS	Retilinear	ângulo	-0,02674
		porcentagem	0,91262
	Colméia	ângulo	0,04909
		porcentagem	0,98240
	Linear	ângulo	0,15534
		porcentagem	0,87670
PLA	Retilinear	ângulo	0,03631
		porcentagem	0,95095
	Colméia	ângulo	0,02137
		porcentagem	0,97336
	Linear	ângulo	0,10981
		porcentagem	0,96892

Com base nos dados tabelados, nota-se que a variável ângulo não apresenta correlação com a tensão última média dos componentes impressos. Dessa forma, ela será descartada do modelo. Novos modelos foram gerados, com base nos termos considerados como significantes para a resposta da tensão, segundo os estudos realizados na Seção 5.2. Os novos modelos simplificados para a resistência à tração dos componentes impressos em PLA e ABS será então apresentados nesta seção.

Os novos modelos foram criados usando igualmente a função *lm* do *software* R. A validade da pressuposição dos resíduos (lembrando que o termo resíduo é referente a diferença entre o valor observado ( $Y_i$ ) e o valor estimado ( $\hat{Y}_i$ )) foi testada utilizando procedimentos do programa em questão, por intermédio de técnicas estatísticas gráficas e numéricas.

Para análise de normalidade dos resíduos foi empregado o método de Shapiro-Wilk, por meio da função *shapiro.test* pertencente ao pacote estatístico do R, para um nível de confiança de 95% e adotando as seguintes hipóteses:  $H_0$ , os resíduos do modelo possuem distribuição normal, e  $H_1$ , os resíduos do modelo não possuem distribuição normal. A estatística- $W$  do método de Shapiro-Wilk é dada segundo a Eq. 5.7:

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i y_i)}{(\sum_{i=1}^n y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (5.7)$$

onde  $n$  é o número de observações e  $a$  é o vetor dado por:

$$a' = (a_1, \dots, a_n) = \frac{m' V^{-1}}{(m' V^{-1} V^{-1} m)^{\frac{1}{2}}} \quad (5.8)$$

sendo  $m_{1 \times n}$  o vetor de valores esperados e  $V_{n \times n}$  a matriz de covariância dos resíduos.

Para testar se a variância dos resíduos é constante (homocedasticidade) foi aplicado o teste de White, através da função *whites.htest* do R, admitindo as seguintes hipóteses:  $H_0$ , homocedasticidade ( $\sigma_i^2 = \sigma^2, \forall i$ ), e  $H_1$ , heterocedasticidade, isto é, ao menos uma das variâncias é diferente. Optou-se pelo teste de White para averiguar a homocedasticidade dos resíduos devido a esse permitir a detecção de formas não lineares de heterocedasticidade, visto que o método cria um modelo auxiliar que relaciona o quadrado dos resíduos com as variáveis explicativas juntamente com os produtos cruzados das mesmas (WHITE, 1980; ANDO; HODOSHIMA, 2007), conforme apresentado na Eq. 5.10:

$$\hat{u}^2 = \gamma_0 + \gamma_1 x_{i1}^2 + \dots + \gamma_p x_{ip} x_{i1} + \gamma_{p+1} x_{i2}^2 + \dots + \gamma_{p(p+1)/2} x_{ip}^2 + e_i \quad (5.9)$$

$$\hat{u}^2 = a_0 + \sum_{j=1}^K \sum_{k=j}^K a_p x_{ij} x_{ik} + e_i \quad (i = 1, \dots, n) \quad (5.10)$$

onde  $e_i$  é o termo do erro. A estatística- $W$  é então dada por  $nR^2 \sim X_{k(k+1)/2}$ , em que  $n$  é o número de observações,  $R^2$  é o coeficiente de determinação do modelo ajustado e  $X_{k(k+1)/2}$  um valor  $p$  associado a distribuição do  $X^2$  com os graus de liberdade dados pelo número de variáveis explicativas do modelo de ajuste auxiliar.

A independência dos resíduos dos modelos de predição simplificados, foi analisada de forma gráfica por intermédio do gráfico dos resíduos versus a ordem de coleta dos dados. Deseja-se averiguar a existência de comportamento tendencioso das leituras apresentados nesse tipo de gráfico, visto que tendências indicam dependência dos dados.

Os resultados para os modelos dados pelas Eq. 5.11 a Eq. 5.16 confirmaram, que para o nível de significância adotado, não houve rejeição da hipótese de normalidade bem como de homocedasticidade dos resíduos. Os modelos finalmente construídos, com variáveis significantes, cujos resíduos possuem distribuição normal e variância constante são apresentados nas ex-pressões que seguem juntamente com algumas estatísticas. Os *p* – *valor* resultantes da aplicação de cada método aos resíduos do modelo são dados entre parênteses nas Tabelas 5.15 a 5.20.

De forma a permitir a avaliação da qualidade dos modelos gerados, algumas medidas estatísticas serão expostas.

- Material: PLA

- a) Preenchimento: colméia.

$$\sigma = 8.8713963 + 0.7760836P - 0.0043677P^2 \quad (5.11)$$

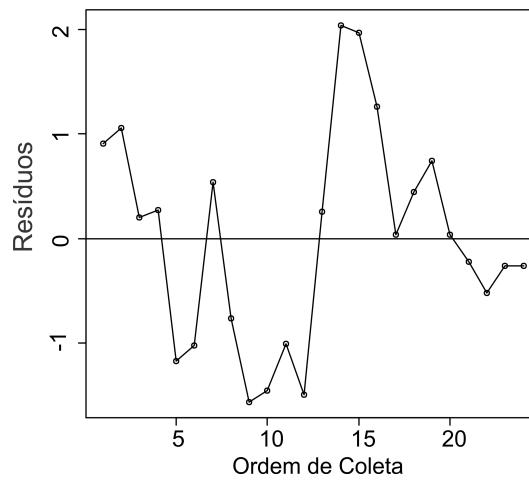
Nota-se pelos dados listados na Tabela 5.15 que o modelo apresentou bons valores para os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$  ajustado), visto que os mesmos indicam que o modelo é capaz de explicar até 97% da variação dos dados. Ainda, os métodos de Shapiro-Wilk e White apontaram que os resíduos possuem normalidade e homocedasticidade.

Tabela 5.15 – Estatísticas Modelo de Predição da Resistência à Tração do PLA-Colméia.

Variável	Valor
Intercepto	8.8713963***
<i>P</i>	0.7760836***
<i>p</i> <sup>2</sup>	- 0.0043677***
$R^2$	0.9801
$R^2$ <i>adj</i>	0.9782
<i>p</i> – <i>valor</i>	$2.2 \times 10^{-16}$
Análise dos Resíduos	
Shapiro-Wilk	0.96595 (0.5689)
White	11.6053 (0.4779)

A independência dos resíduos pode ser averiguada por meio do gráfico exposto na Figura 5.31. Nota-se que os resíduos estão dispostos de maneira casual no gráfico, ou seja, os dados no gráfico não apontam comportamento tendencioso, indicando a independência dos dados.

Figura 5.31 – Gráfico para análise de independência dos dados (PLA-Colméia).



Fonte: A autora.

b) Preenchimento: linear.

$$\sigma = 21.27704 + 0.21662P \quad (5.12)$$

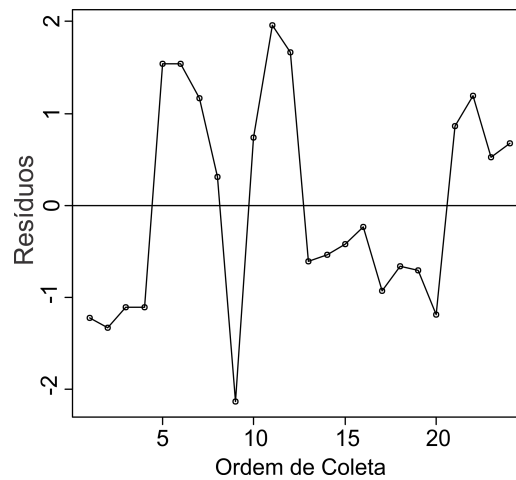
A Tabela 5.16 exhibe valores elevados para os coeficientes de determinação e de determinação ajustados (>90%). Os resíduos apresentaram ainda normalidade e homocedasticidade, segundo os testes de Shapiro-Wilk e White.

Tabela 5.16 – Estatísticas Modelo de Predição da Resistência à Tração do PLA-Linear.

Variável	Valor
Intercepto	21.27704***
<i>P</i>	0.21662***
$R^2$	0.9388
$R^2_{adj}$	0.9360
<i>p</i> -valor	$7.794 \times 10^{-15}$
Análise dos Resíduos	
Shapiro-Wilk	0.9444 (0.2043)
White	7.5196 (0.8215)

O gráfico dos resíduos versus a ordem de coleta dos dados para o modelo Eq. 5.12 é dado na Figura 5.32. De maneira análoga ao comportamento da Figura 5.31, vê-se que os dados dispõem-se de modo aleatório, sem acompanhar nenhuma tendência.

Figura 5.32 – Gráfico para análise de independência dos dados (PLA-Linear).



Fonte: A autora.

c) Preenchimento: retilinear.

$$\sigma = 68.61 - 1.010P + 0.009771P^2 - 571.2P^{-1} \quad (5.13)$$

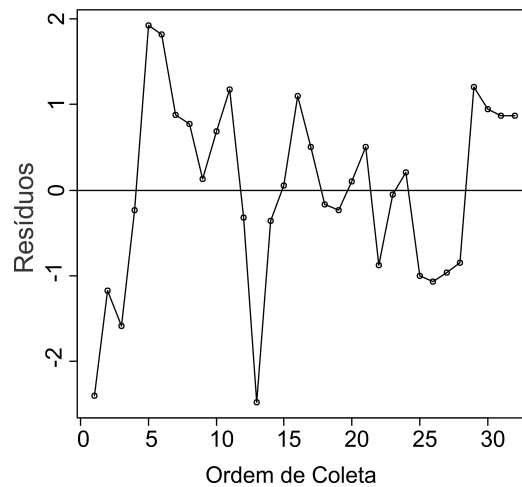
O modelo dado na Eq. 5.13 apresentou valores elevados para o coeficiente de determinação e sua versão ajustada, conforme pode ser visualizado na Tabela 5.17. Ainda, os métodos de Shapiro-Wilk e White apontaram que os resíduos possuem normalidade e homocedasticidade.

Tabela 5.17 – Estatísticas Modelo de Predição da Resistência à Tração do PLA-Retilinear.

Variável	Valor
Intercepto	68.61***
$P^{-1}$	-571.2**
$P$	- 1.010***
$P^2$	0.009771***
$R^2$	0.9929
$R^2 \text{ adj}$	0.9922
$p - \text{valor}$	$2.2 \times 10^{-16}$
<b>Análise dos Resíduos</b>	
Shapiro-Wilk	0.96825 (0.4524)
White	9.6491 (0.6467)

A hipótese de independência dos dados é analisada por intermédio do gráfico exposto na Figura 5.33.

Figura 5.33 – Gráfico para análise de independência dos dados (PLA-Retilinear).



Fonte: A autora.

- Material: ABS

a) Preenchimento: colméia.

$$\sigma = 13.105475 + 0.107981P \tag{5.14}$$

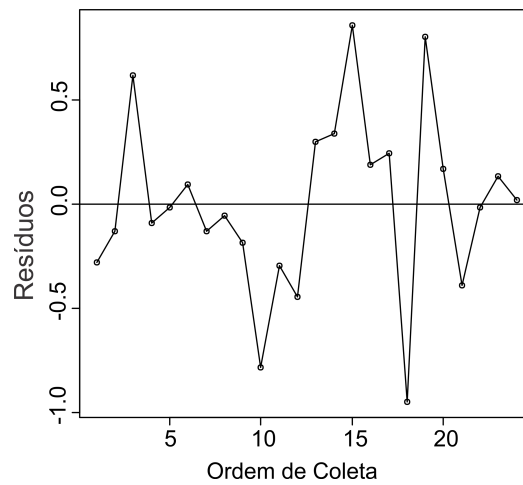
Observa-se nos dados tabelados que o modelo Eq. 5.14 possui coeficientes de determinação fortemente significativos superiores a 95%. Os métodos de Shapiro-Wilk e White de acordo com a Tabela 5.18 indicaram ainda que os resíduos possuem normalidade e homocedasticidade.

Tabela 5.18 – Estatísticas Modelo de Predição da Resistência à Tração do ABS-Colméia.

Variável	Valor
Intercepto	13.105475***
$p^2$	0.107981***
$R^2$	0.9651
$R^2_{adj}$	0.9635
$p - valor$	$2.2 \times 10^{-16}$
Análise dos Resíduos	
Shapiro-Wilk	0.97278 (0.7356)
White	6.4987 (0.8889)

Para verificar a hipótese de independência dos dados em estudo, tem-se o gráfico dos resíduos versus a ordem de coleta dos dados apresentado na Figura 5.34.

Figura 5.34 – Gráfico para análise de independência dos dados (ABS-Colméia).



Fonte: A autora.

b) Preenchimento: retilinear.

$$\sigma = 13.658825 + 0.001228P^2 \quad (5.15)$$

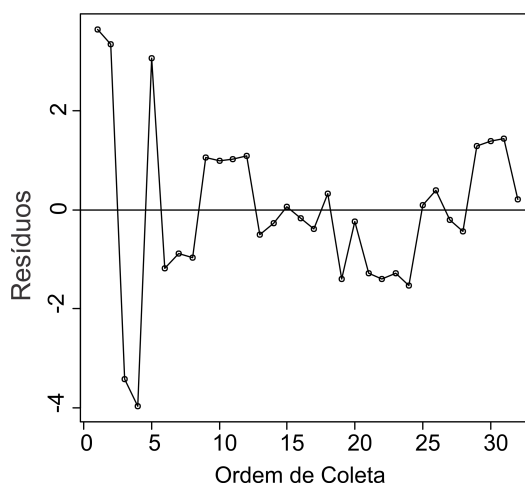
A Tabela 5.19 expõe os resultados obtidos por meio da aplicação dos métodos de Shapiro-Wilk e White ao modelo, bem como algumas estatísticas básicas referente a regressão realizada, também confirmando que os resíduos possuem normalidade e homocedasticidade.

Tabela 5.19 – Estatísticas Modelo de Predição da Resistência à Tração do ABS-Retilinear.

Variável	Valor
Intercepto	13.658825***
$p^2$	0.001228***
$R^2$	0.8771
$R^2 \text{ adj}$	0.8730
$p\text{-valor}$	$3.397 \times 10^{-15}$
Análise dos Resíduos	
Shapiro-Wilk	0.95687 (0.2251)
White	18.0987 (0.1127)

A Figura 5.35 mostra graficamente o comportamento dos resíduos versus a ordem de coleta dos dados.

Figura 5.35 – Gráfico para análise de independência dos dados (ABS-Retilinear).



Fonte: A autora.

Para o preenchimento linear (material ABS), a análise dos resíduos rejeitou a hipótese de normalidade. Dessa forma, foi realizado uma nova abordagem para a construção do modelo de predição. Foi testado termos não lineares, tais como exponenciais, raiz quadrada, e logaritmo para realizar a modelagem da resistência à tração dos componentes impressos em ABS com a forma de preenchimento linear. O modelo construído, com as melhores estatísticas e que respeitou os pressupostos básicos de normalidade e homocedasticidade dos resíduos, foi selecionado. Tais estatísticas são dadas na Tabela 5.20.

Para o preenchimento linear, material ABS, o modelo de predição da tensão última média dos componentes impressos, é aproximado por uma simples função racional, conforme Eq. (5.16):

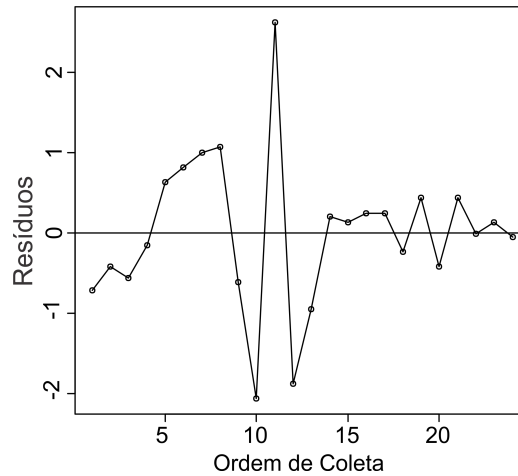
$$\sigma = 20.6459 - \frac{154.7515}{P} \quad (5.16)$$

Tabela 5.20 – Estatísticas Modelo de Predição da Resistência à Tração do ABS-Linear.

Variável	Valor
Intercepto	20.6459***
$P^{-1}$	-154.7515***
$R^2$	0.7784
$R^2 adj$	0.7683
$p - valor$	$1.193 \times 10^{-8}$
Análise dos Resíduos	
Shapiro-Wilk	0.94623 (0.2242)
White	13.4583 (0.3366)

A representação gráfica do comportamento dos resíduos diante da ordem de coleta dos dados, é dada na Figura 5.36.

Figura 5.36 – Gráfico para análise de independência dos dados (ABS-Linear).



Fonte: A autora.

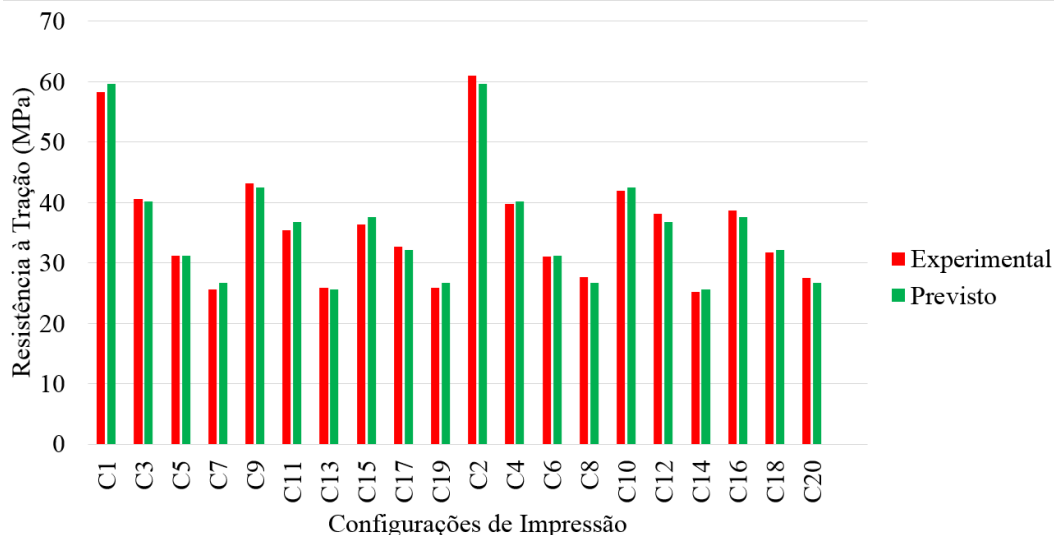
Os valores previstos pelos novos modelos, assim como os valores experimentais adquiridos por intermédio dos ensaios para as amostras confeccionadas em PLA, são exibidos na Tabela 5.21.

Tabela 5.21 – Resposta do modelo de predição simplificado para o termoplástico PLA.

Configuração	Forma	Ângulo	Porcentagem	Experimental	Previsto	Erro absoluto	Erro Relativo
C1	Retilinear	0	100	58,24945	59,60800	1,359	0,023
C3	Retilinear	0	75	40,61479	40,20588	0,409	0,010
C5	Retilinear	0	50	31,15688	31,11350	0,043	0,001
C7	Retilinear	0	25	25,64597	26,61888	0,973	0,038
C9	Colméia	0	75	43,11875	42,50935	0,609	0,014
C11	Colméia	0	50	35,37389	36,75633	1,382	0,039
C13	Colméia	0	25	25,86014	25,54367	0,316	0,012
C15	Linear	0	75	36,33264	37,52354	1,191	0,033
C17	Linear	0	50	32,66500	32,10804	0,557	0,017
C19	Linear	0	25	25,82292	26,69254	0,870	0,034
C2	Retilinear	45	100	60,94333	59,60800	1,335	0,022
C4	Retilinear	45	75	39,77701	40,20588	0,429	0,011
C6	Retilinear	45	50	31,05451	31,11350	0,059	0,002
C8	Retilinear	45	25	27,58236	26,61888	0,963	0,035
C10	Colméia	45	75	41,89944	42,50935	0,610	0,015
C12	Colméia	45	50	38,13854	36,75633	1,382	0,036
C14	Colméia	45	25	25,22715	25,54367	0,317	0,013
C16	Linear	45	75	38,65993	37,52354	1,136	0,029
C18	Linear	45	50	31,65958	32,10804	0,448	0,014
C20	Linear	45	25	27,50778	26,69254	0,815	0,030
<b>Erro Relativo Médio</b>						<b>0,021</b>	

A representação gráfica dos dados apresentados na Tabela 5.21, pode ser visualizada na Figura 5.37.

Figura 5.37 – Resposta da resistência à tração mensurada e prevista, modelos simplificados (Polímero PLA).



Fonte: A autora.

Conforme o exposto, a modelagem realizada prevê satisfatoriamente o comportamento da resistência à tração dos componentes impressos em PLA. Observa-se que há pouco desvio entre a resposta encontrada por meio dos ensaios e a resposta prevista, fornecendo um erro relativo máximo de 3.9% e um erro relativo médio de 2.1%.

As respostas para as médias das tensões últimas, determinadas pelos modelos de predição gerados para o material ABS, são exibidos na Tabela 5.22.

Tabela 5.22 – Resposta do modelo de predição simplificado para o termoplástico ABS.

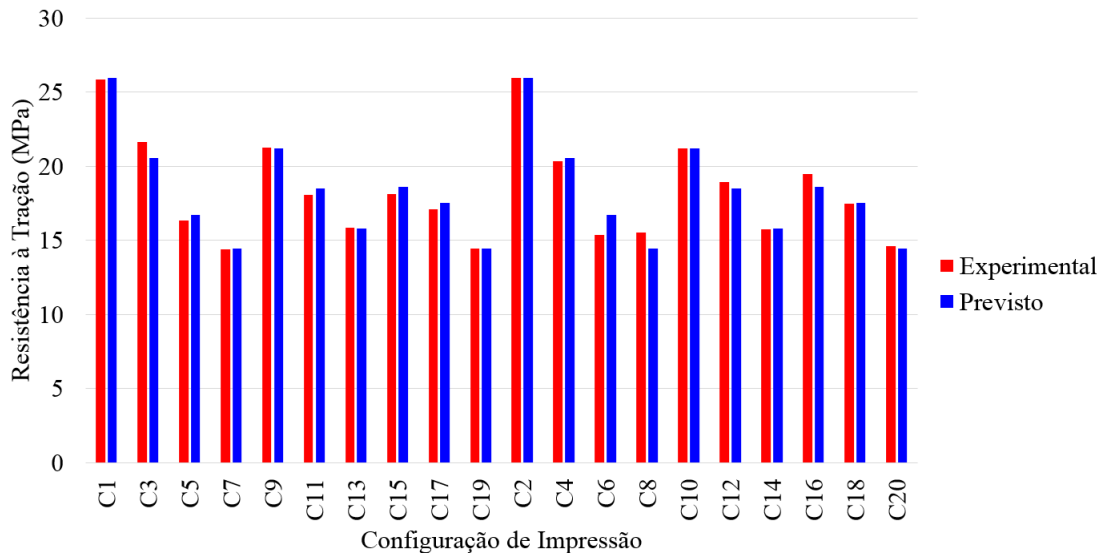
Configuração	Forma	Ângulo	Porcentagem	Experimental	Previsto	Erro absoluto	Erro Relativo
C1	Retilinear	0	100	25,85076	25,93883	0,088	0,003
C3	Retilinear	0	75	21,61528	20,56633	1,049	0,049
C5	Retilinear	0	50	16,30917	16,72883	0,420	0,026
C7	Retilinear	0	25	14,39153	14,42633	0,035	0,002
C9	Colméia	0	75	21,23354	21,20405	0,029	0,001
C11	Colméia	0	50	18,07792	18,50453	0,427	0,024
C13	Colméia	0	25	15,87174	15,80500	0,067	0,004
C15	Linear	0	75	18,12444	18,58255	0,458	0,025
C17	Linear	0	50	17,07250	17,55087	0,478	0,028
C19	Linear	0	25	14,46597	14,45584	0,010	0,001
C2	Retilinear	45	100	25,95319	25,93883	0,014	0,001
C4	Retilinear	45	75	20,34924	20,56633	0,217	0,011
C6	Retilinear	45	50	15,35972	16,72883	1,369	0,089
C8	Retilinear	45	25	15,50868	14,42633	1,082	0,070
C10	Colméia	45	75	21,17771	21,20405	0,026	0,001
C12	Colméia	45	50	18,92493	18,50453	0,420	0,022
C14	Colméia	45	25	15,74139	15,80500	0,064	0,004
C16	Linear	45	75	19,46486	18,58255	0,882	0,045
C18	Linear	45	50	17,46354	17,55087	0,087	0,005
C20	Linear	45	25	14,58708	14,45584	0,131	0,009
<b>Erro Relativo Médio</b>						<b>0,021</b>	

Os modelos forneceram um erro relativo máximo de 8.9% e um erro relativo médio

de 2.1%. Percebe-se que a modelagem realizada prevê muito bem o desempenho mecânico dos componentes impressos considerando os parâmetros estudados neste trabalho.

A Figura 5.38 expõe, graficamente, os valores presumidos pelos modelos de predição para o material ABS e as respostas médias da tensão última das amostras testadas.

Figura 5.38 – Resposta da resistência à tração mensurada e prevista, modelos simplificados (Polímero ABS).



Fonte: A autora.

Nota-se, que os modelos construídos são eficientes e simples, visto que a resposta obtida por estes, pouco diverge da resposta encontrada nos testes. Além disso, o estudo revelou que o parâmetro ângulo pouco influência na resistência à tração dos componentes impressos, independente do tipo de material. Já a variável porcentagem de preenchimento, mostrou ser significativamente relevante no desempenho mecânico das peças construídas através da impressão 3D.

De forma sucinta, os modelos simplificados oferecem boas qualidades estatísticas, com coeficientes de determinação ( $R^2$  e  $R^2$  ajustado) elevados e significativos, uma vez que seus valores indicam uma capacidade explicativa dos dados superior a 75%. Além disso, os erros médios, de forma geral, são baixos e inferiores a 10%. Embora as taxas de erro encontradas nos modelos da Seção 5.2 sejam mais baixas, os modelos simplificados construídos nessa Seção são mais econômicos e eficientes e estatisticamente mais viáveis, pois trabalham apenas com variáveis que são realmente importantes para o alcance da tensão última do objeto a ser confeccionado.

Além disso, almeja-se a obtenção de modelos simples e confiáveis, para a determinação da resistência à tração de objetos impressos pela tecnologia de impressão por extrusão de material, num intervalo contínuo de 0 a 100% de preenchimento.

## Capítulo 6

---

# Análise Básica da Prótese Biônica ALX

---

Conforme apontado previamente, os materiais investigados nesse trabalho são empregados na confecção de próteses de membro superior de baixo custo desenvolvidas no LaMoP3D. O estudo das propriedades de tais materiais visou permitir a identificação de configurações de impressão capazes de fornecer componentes impressos com maior resistência mecânica, de forma a propiciar consequentemente, dispositivos protéticos mais resistentes.

Nesse âmbito, tendo em vista contribuir para a obtenção de maiores conhecimentos das limitações e funcionalidades da prótese biônica ALX (exposta no Capítulo 3), não somente no que diz respeito a sua estrutura material mas também as suas características mecânicas, esse capítulo foi desenvolvido. Ressalta-se que os resultados aqui apresentados consistem em um estudo inicial introdutório, de modo que os mesmos sirvam de base para identificar as reais potencialidades da prótese e eventuais limitações do projeto físico, não somente no que tange a aparência mas também a funcionalidade da mesma na execução de ações cotidianas.

De posse do protótipo físico, constatou-se que a principal limitação do dispositivo reside no seu sistema de acionamento, principalmente o sistema de compensação da prótese ALX, os cabos que transpassam as falanges, o servomotor e sua fonte de alimentação. Dessa forma, optou-se pela realização de uma análise física e não virtual da prótese de mão, de forma a identificar os pontos sensíveis do sistema de controle bem como da atuação do mesmo ao longo da execução do movimento básico de flexão dos dedos.

De acordo com [Napier \(1956\)](#) a mão humana possui duas funções básicas de preensão: a preensão de precisão e a preensão de força. A preensão de precisão é geralmente efetuada utilizando o polegar e os dedos indicador e médio (lado mediano), segurando o objeto entre a face palmar dos dedos e o polegar oposto. Essa forma de preensão é mais especializada e delicada. Já a preensão de força, é mais apropriada para preensões relativamente volumosas, que favorecem mais o uso total da força. Esse tipo de preensão abrange segurar o objeto entre os dedos parcialmente flexionados em oposição à contrapressão exercida pela

face palmar, nessa forma de preensão é empregado também o lado ulnar da mão.

A preensão palmar consiste na preensão realizada em "mão cheia" ou ainda em "palma cheia", empregada geralmente para segurar objetos volumosos. De forma breve, o movimento de preensão palmar ocorre em 3 etapas, são elas: a extensão dos dedos, a flexão das articulações metacarpofalangeanas com extensão das falanges distais e por fim, a flexão das articulações distais (MOURA, 2008).

A avaliação funcional da mão humana pode ser efetuada por meio de diversas formas, dentre elas destaca-se a análise da preensão palmar. Alguns trabalhos que avaliaram a força de preensão exercida pela palma consistem nos estudos de Fernandes *et al.* (2011), Costa e Oliveira (2011), Armstrong e Oldham (1999), Ribom *et al.* (2011), Gonçalves *et al.* (2010), Lopes *et al.* (2017), Li *et al.* (2010), Young *et al.* (1989), Budziareck, Duarte e Barbosa-Silva (2008), Schlüssel *et al.* (2008) .

A capacidade de preensão, mais especificamente a força exercida no movimento de preensão, constitui-se em um tópico fundamental no estudo das capacidades manuais, de movimento, transporte, força e manipulação de objetos. Isto se deve principalmente ao fato de a força de preensão palmar servir de indicador da integridade funcional do membro superior, permitindo a identificação análise clínica de patologias em tais membros (NORMAN *et al.*, 2011; SPRUIT *et al.*, 2013; JÜRIMÄE; HURBO; JÜRIMÄE, 2009; GÜNTHER *et al.*, 2008).

Nesse contexto, buscou-se analisar a força exercida pelo servomotor da prótese biônica, no sistema de compensação, de forma a avaliar a força de tração exercida pelos cabos que transpassam cada falange no momento da preensão palmar. Essa análise foi realizada tendo em vista conhecer a capacidade do motor de efetuar o movimento de preensão palmar, buscando obter limiares de desempenho reais para a prótese, na manipulação de objetos. Como referencial para os resultados encontrados para força de preensão palmar exercida pela prótese, será utilizado o trabalho desenvolvido por Moura (2008). Tal fato se deve principalmente a margem abrangente de resultados encontrados pela autora, para a força de preensão palmar, ao longo do desenvolvimento humano.

Moura (2008) analisou a força de preensão palmar em diferentes faixas etárias do desenvolvimento humano. O estudo contou com 600 indivíduos, 300 homens e 300 mulheres, desde a fase criança (4 a 5 anos) até a fase idoso (a partir de 65 anos). A pesquisa demonstrou que os homens possuem força de preensão superior a das mulheres, em todas as faixas do desenvolvimento, e crianças em idade pré-escolar (4 a 5 anos) possuem forças médias de preensão semelhantes. Os dados da força de preensão palmar foram obtidos por intermédio de um dinamômetro Jamar. Os resultados da força média de preensão palmar encontrada pela autora são apresentados na Tabela 6.1:

A Tabela 6.2 apresenta a força de preensão palmar média de acordo com distribuição geral dos indivíduos segundo a variável sexo.

Tabela 6.1 – Força de Preensão palmar média ao longo do desenvolvimento humano.

Grupos	Média de Idade	Preensão Palmar (Kg/F)	
		Mão Direita	Mão Esquerda
Pré-Escolar	4,5±0,50	6,93±1,95	6,75±2,01
Escolar	8,7±2,00	14,18±6,05	13,38±5,64
Adolescente	15,46±1,69	34,37±11,61	32,31±11,68
Adulto	31,35±7,36	40,36±11,21	37,93±11,05
Meia-idade	54,40±5,94	33,28±11,77	31,63±11,52
Idoso	75,36±6,72	28,11±10,07	25,73±9,19

Fonte: (MOURA, 2008).

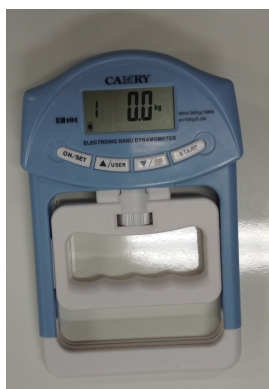
Tabela 6.2 – Força de Preensão palmar média ao longo do desenvolvimento humano (Distribuição geral por sexo).

Todos os Grupos	Média de Idade	Preensão Palmar (Kg/F)	
		Mão Direita	Mão Esquerda
Homens	31,79±26,37	32,13±17,23	30,31±16,48
Mulheres	31,49±25,95	20,31±9,60	18,92±8,82

Fonte: (MOURA, 2008).

Para medir a força exercida pelo movimento de preensão da prótese sobre um objeto, foi utilizado um dinamômetro de mão eletrônico Camry (Figura 6.1). O dispositivo possui dimensões 19x12 cm, com manivela auto-ajustável que permite sua acessibilidade para todas as idades. Além disso, apresenta captura automática da força máxima de preensão palmar, permitindo o armazenamento e a releitura dos dados para diferentes usuários. Dotado de sensor de alta precisão da medida da tensão, fornece leitura precisa da força de preensão da palma até 90Kg/198Lbs, com exatidão de aproximadamente 0.5Kg/1Lb.

Figura 6.1 – Dinamômetro de mão eletrônico.



Fonte: A autora.

Este tipo de dispositivo é equipado com circuito de condicionamento simples e de baixo custo. Dotado de prontuário eletrônico para aquisição de dados e acompanhamento

da evolução clínica do paciente, além disso é preciso, de simples leitura e possui grande sensibilidade.

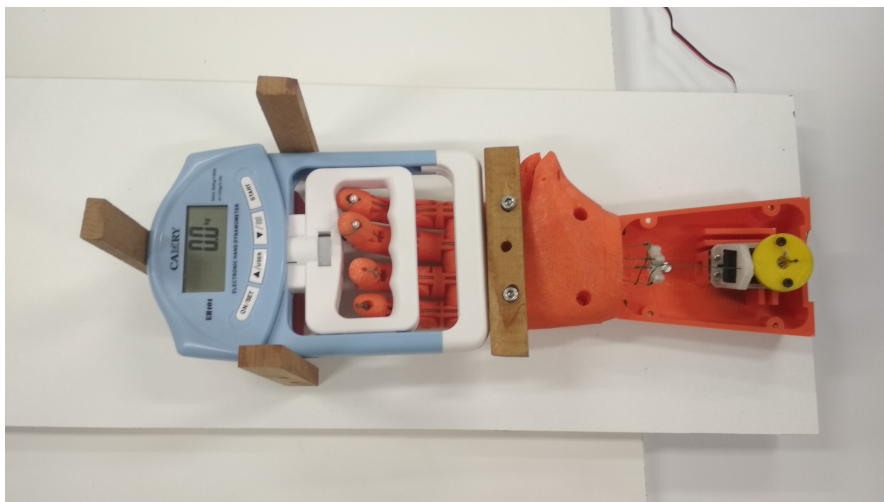
Salienta-se, que por meio do estudo realizado por [Muñoz et al. \(2016\)](#), foi possível verificar a baixa divergência da força de prensão palmar mensurada por intermédio do dinamômetro Jamar e por um dinamômetro Camry indicando que a diferença dos dispositivos de medida, não interfere prejudicialmente no resultado.

No trabalho de [Muñoz et al. \(2016\)](#) foram analisadas 133 pessoas, entre homens e mulheres na faixa etária de 18 a 88 anos e idade média de 47 anos ( $\pm 20.7$ ). Os resultados para a força média calculada com o dinamômetro Jamar correspondem a  $32.15 \pm 9.96$  Kg e  $30.43 \pm 9,81$  Kg mão direita e esquerda, respectivamente; ao passo que com o dinamômetro Camry foi de  $29.95 \pm 9.18$  Kg e  $28.2 \pm 9.02$  Kg para a mão direita e esquerda, nessa ordem.

Em continuidade ao presente pesquisa, o equipamento foi testado primeiramente por diferentes colaboradores do LaMoP3D, de modo a avaliar as leituras da força de prensão palmar fornecidas pelo dispositivo. As respostas coletadas foram condizentes com os resultados apontados pelo estudo de [Moura \(2008\)](#) e pelo prontuário do próprio fabricante. Dessa forma, foi dada continuidade ao procedimento experimental da obtenção da força de prensão palmar da prótese.

O teste de aferição da força de prensão da palma do dispositivo protético ALX, foi realizado efetuando-se o engaste do punho da prótese bem como do dinamômetro eletrônico, de modo a propiciar a leitura isolada, isto é, sem interferências externas, do movimento de prensão realizado pela mão da prótese propriamente dita. O procedimento de obtenção da leitura em questão, é apresentado na Figura 6.2.

Figura 6.2 – Procedimento experimental para leitura da prensão palmar da prótese de biônica ALX.



Fonte: A autora.

Para conhecimento, a prótese foi alimentada com 6V e uma corrente de 3A, por inter-

médio de uma bateria de 7.4V LiPo, atuando em conjunto com um regulador de tensão para 6V.

Os resultados obtidos para força de preensão palmar da prótese por meio do dinamômetro de mão eletrônico atingiu uma média de 4.1 Kg, visto que o mesmo possui força de preensão palmar significativamente fraca.

Todavia, vale ressaltar que o movimento de preensão palmar de uma pessoa envolve a atividade de diversos músculos, os quais são responsáveis por potencializar tal movimento. E, esse cenário não pode ser desempenhado pelo dispositivo protético de forma fidedigna, visto que os fatores da prótese que viriam a contribuir para a realização deste movimento, são estáticos.

Os agentes responsáveis por realizar o movimento das falanges e conseqüentemente por efetuar, na prótese, a preensão, consistem no uso combinado de cabos flexíveis e não flexíveis tracionados por um sistema de controle servomotor. Cabos estes, que cumprem o papel da musculatura que abrange o antebraço, palma, dorso e dedos da mão e realizam a flexão dos dedos da prótese.

Assim, decorrente dos dados obtidos pelo dinamômetro de mão elétrico e a partir do fundamento exposto anteriormente, optou-se por analisar a força de tração realizada pelo servomotor nos cabos interligados aos dedos do dispositivo protético. Busca-se por meio dessa análise, conhecer a capacidade, interferências e as limitações do sistema de controle que move os dedos, visto que o mesmo constitui-se no principal elemento capaz de viabilizar um aspecto funcional à prótese.

Para mensurar a força de tração exercida pelo motor nos cabos que transpassam as falanges e são determinantes para o movimento de preensão, foi realizado um experimento com o auxílio de um dinamômetro digital portátil Soil Control (Figura 6.3). Tal equipamento possui dimensões 21,5x9x4,5 cm e é capaz de mensurar até 100Kg/220Lb/980N com exatidão de aproximadamente 0.5%.

Figura 6.3 – Dinamômetro Digital Portátil.

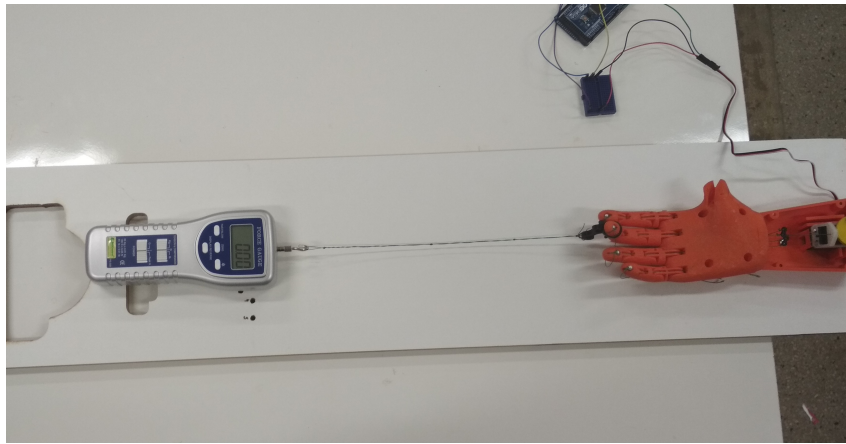


Fonte: A autora.

Para realização do procedimento experimental, foram fixados a prótese biônica e o

dinamômetro dispostos axialmente, com a linha de atuação da força e do sensor de leitura, passando pelo centróide de ambos os dispositivos (Figura 6.4).

Figura 6.4 – Leitura da capacidade de tração do sistema de controle eletromecânico da prótese de biônica ALX - dedos individuais.



Fonte: A autora.

A coleta da força realizada nos cabos e nas falanges contou inicialmente com o auxílio de uma linha multifilamento (mesmo material dos cabos que passam através dos dedos da prótese), sendo substituída posteriormente por fios de aço. Tal troca foi necessária, visto que durante a realização dos ensaios constatou-se que o fio multifilamento deformava distendendo-se progressivamente à medida que o motor era acionado.

Primeiramente, esse fio foi conectado a cada uma das juntas rotativas que ligam as falanges proximal-medial e medial-distal, e em seguida presa ao sensor. Posteriormente, a prótese foi acionada, por intermédio da placa Arduíno, para realizar o movimento de preensão palmar. A resposta da força foi coletada para os dedos indicador, médio, anelar e mínimo.

As respostas foram coletadas em *N* e então convertidas para a unidade *Kg*, de modo a permitir a comparação com dados da literatura. Os resultados apresentados na Tabela 6.3 correspondem a média de três leituras.

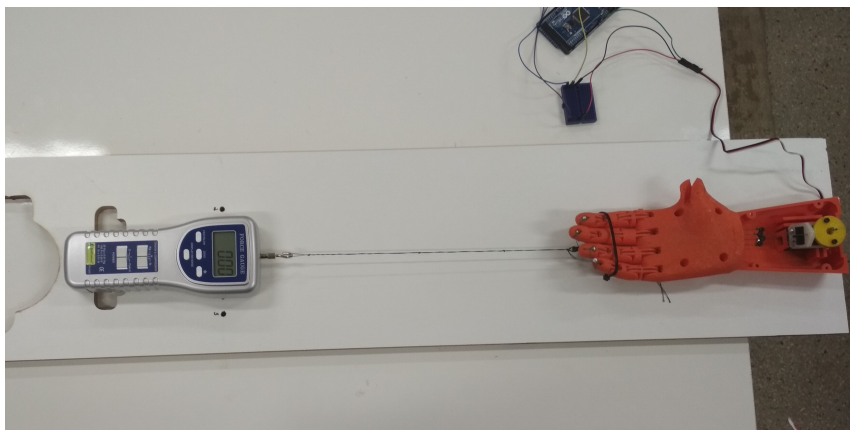
Tabela 6.3 – Tração média final exercida pelo servomotor em cada dedo.

Dedos	Força Média	
	<i>N</i>	<i>Kg</i>
Indicador	12,28	1,25
Médio	22,75	2,31
Anular	29,18	2,98
Mínimo	21,05	2,15

O segundo passo foi realizar a coleta da força exercida pelos quatro dedos em estudo, mais precisamente, as falanges mediais dos quatro dedos foram amarradas e a prótese aci-

onada para prensão palmar novamente (Figura 6.5). A força de tração exercida pelos cabos nos quatro dedos, durante o movimento, atingiu um pico de  $9.55\text{ N}$  e uma média de  $9.23\text{ N}$  considerando 3 leituras, equivalente a  $0.97\text{ Kg}$  e  $0.94\text{ Kg}$ , respectivamente.

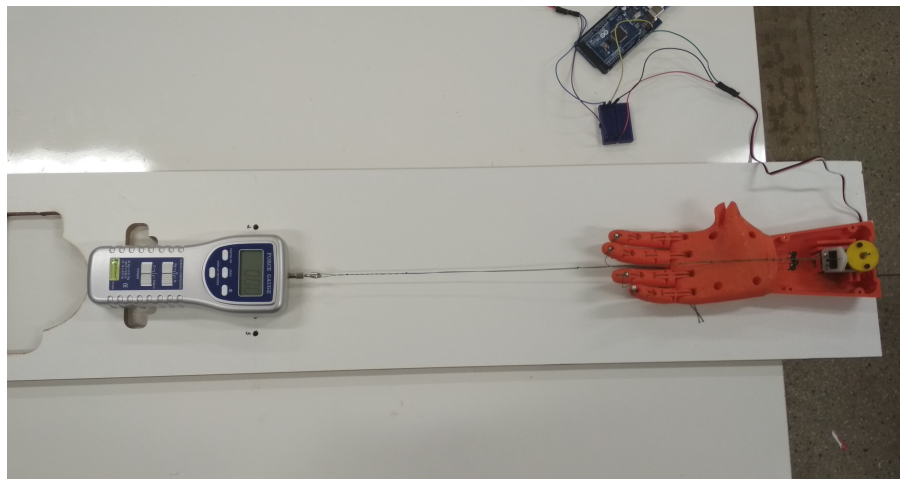
Figura 6.5 – Leitura da capacidade de tração do sistema de controle eletromecânico da prótese de biônica ALX - Dedos em conjunto.



Fonte: A autora.

A terceira sessão de coleta, foi referente a capacidade do motor de tracionar os cabos que transpassam os dedos durante o movimento de prensão palmar. Para tanto, um fio de nylon foi conectado entre a roldana controlada pelo motor e o sistema de compensação dos dedos (estrutura apresentada no Capítulo 2.4), tal como apresentado na Figura 6.6. A força média realizada pelo motor no sistema de compensação consiste em média em  $94.18\text{ N}$  que corresponde a  $9.60\text{ Kg}$ . Observa-se uma perda de até 87% da capacidade de tração dos cabos, após o sistema de compensação.

Figura 6.6 – Leitura da capacidade de tração do sistema de controle eletromecânico da prótese de biônica ALX.



Fonte: A autora.

Dessa forma, constata-se que apenas 13% aproximadamente, da força de tração exercida pelo motor através dos cabos, realmente chega aos dedos. Além disso, a força exercida pelos 4 dedos por intermédio da tração dos cabos corresponde a apenas 13% da força de preensão palmar de uma criança na idade pré escolar. Essa perda notável na força de tração final dos cabos dos dedos, pode ser devido a diversos fatores, como: o sistema de compensação não ser adequado, o material do qual é feito os cabos deformatar-se/ceder ou ainda a fonte de alimentação do sistema de acionamento, ou seja, a bateria e a corrente que alimentam o servomotor.

Durante o estudo, algumas necessidades de melhorias no dispositivo protético ALX foram observadas, tais como a inclusão de um sistema de compensação para uso efetivo do polegar, adequação do projeto para flexão total dos dedos, inclusão de canaletas no dorso da mão para facilitar a passagem dos cabos além de melhorias na parte de anexação desses, de forma a evitar que os mesmos se desprendam da falange distal. Fato que ocorreu com frequência, durante o manuseio da prótese.

Ainda, foi possível identificar deficiências no sistema de compensação dos cabos da prótese ALX, o qual permite o movimento conjunto dos dedos. Observa-se também, a necessidade de substituição do servomotor ou de adaptações no sistema de controle da prótese, visto que o mesmo exerce força insuficiente para tracionar os cabos de forma a proporcionar uma força de preensão palmar próxima da mão humana real.

Contudo, destaca-se o diferencial do projeto anatômico da prótese ALX desenvolvido no LaMoP3D, o qual é bem próximo da mão humana. Seu peso é ainda mais leve que o de um membro superior real, evitando a fadiga do membro remanescente. O material do qual a prótese é confeccionada oferece boa resistência mecânica e biodegradabilidade, conforme discutido neste estudo e por fim, o custo final do dispositivo é acessível a pessoas com baixo poder aquisitivo, contribuindo para a reabilitação de pessoas com deficiência e para uma melhor qualidade de vida das mesmas.

Por meio da realização deste estudo, foi possível constatar que os materiais termoplásticos utilizados pelo Laboratório de Modelagem e Prototipagem 3D, na confecção de dispositivos protéticos não representam uma limitação para seu uso. Ao contrário, os mesmos oferecem boas propriedades que justificam sua aplicação na confecção de próteses pela técnica de impressão 3D por extrusão de material, visto que são capazes de proporcionar boa resistência mecânica, boa processabilidade, boa aparência e biodegradabilidade.

## Capítulo 7

---

# Conclusões e Trabalhos Futuros

---

A impressão 3D, em geral, é um processo de manufatura que permite maior customização, propiciando uma melhor adequação do produto para o objetivo final, diferentemente de métodos tradicionais, como moldagem e injeção. Embora seja uma tecnologia recente, ela apresenta um grande potencial para aplicações em diversas áreas, dentre elas a engenharia, a medicina e a tecnologia assistiva.

Com base na revisão sistemática da literatura realizada, foi possível concluir que os parâmetros tipo de material, orientação de impressão, entretrama, porcentagem e ângulo de preenchimento, número de contornos e cor do material exercem alta influência nas propriedades mecânicas das peças finais. Todavia, parâmetros como ângulo de impressão possuem pouco efeito na resistência à tração das mesmas. Por meio do *mapping study* foi possível identificar a influência dos parâmetros forma de preenchimento e porcentagem de preenchimento foram pouco abordados, evidenciando a necessidade de mais estudos.

No presente trabalho, ensaios experimentais de tração foram realizados, tendo em vista obter maiores informações da resistência mecânica dos materiais polímeros, comumente usados no processo de impressão 3D por extrusão de material, visando a análise da resistência mecânica dos mesmos quando alterados seu padrão e percentual de preenchimento.

A partir dos experimentos efetuados foi possível concluir que, os objetos confeccionados com o material PLA, pela tecnologia de impressão por extrusão de material, são altamente influenciados pelo percentual de preenchimento da estrutura. Julgando pelos resultados alcançados e analisados, constatou-se haver uma perda do desempenho mecânico da peças impressas, quando sujeitas a níveis de preenchimento parciais.

Já os componentes impressos em ABS, aqueles confeccionados com preenchimento retilinear e linear, oportunizam minimizar os percentuais de preenchimento sem perdas significativas na resistência à tração de tais componentes. Dessa forma, observou-se a possibilidade de minimizar não somente percentuais de preenchimento de estruturas confeccio-

nadas em ABS, mas também, de forma indireta, reduzir tempos de impressão bem como o custo com matéria prima e peso do objeto.

Em continuidade, modelos de regressão foram construídos a partir dos resultados experimentais alcançados, buscando estimar a tensão última média de componentes impressos, tendo como variáveis explicativas a porcentagem e o ângulo de preenchimento. Por meio da análise estatística dos modelos criados, constatou-se que a variável ângulo de preenchimento pouco influi na resistência à tração dos componentes confeccionados. Dessa forma, uma simplificação dos modelos foi efetuada visando o uso somente de variáveis relevantes.

Os modelos simplificados para estimativa das tensões últimas médias forneceram parâmetros estatísticos que os caracterizam como de boa qualidade, propiciando sua aplicação para estimativa da tensão última média de componentes impressos pela técnica de extrusão de material, a partir da pré-seleção do termoplástico e da forma de preenchimento da peça conforme mais convém a geometria e uso do objeto.

As versões sintetizadas dos modelos para predição da tensão última média mostraram-se eficientes. Todavia, observou-se leves reduções nos coeficientes de determinação dos novos modelos, situação esta que não os desqualifica, uma vez que o emprego da variável ângulo de preenchimento como regressora pouco contribuía para a estimativa da tensão última média das peças fabricadas, optando preferencialmente por considerar apenas variáveis significativas como dados de entrada.

Para uma análise mais robusta, sugere-se a obtenção e uso de uma amostra maior de dados, em virtude das características mecânicas de tais materiais serem sensíveis à variações nos parâmetros de impressão e condições ambientais e operacionais, tornando mais complexa a aplicação dos modelos.

Ainda, efetuou-se uma análise funcional da estrutura da prótese de mão ALX. O dispositivo ALX foi desenvolvido no próprio Laboratório de Modelagem e Prototipagem 3D. A avaliação das capacidades funcionais e manipulativas da prótese contou com o auxílio de dinamômetros palmar e digital, para aferição da força de preensão palmar e capacidade de tração do motor nos cabos responsáveis por realizar a flexão dos dedos, visto que estes exercem papel análogo aos músculos da mão.

Por meio desse estudo, verificou-se que a força de preensão palmar média exercida pela prótese é de 4.1 Kg. Já o motor consegue exercer até 94.18 N em média de tração nos cabos que transpassam as falanges. De forma geral, constatou-se uma perda de cerca de 87% da força de tração exercida pelo motor até a falange distal. Além disso, a força exercida pelos 4 dedos por meio da tração dos cabos corresponde a apenas 13% da força de preensão palmar de uma criança entre 4 e 5 anos.

Apesar de limitações identificadas como a deficiência no sistema de compensação

dos cabos que flexionam os dedos e não abrange o uso do polegar, destaca-se a anatomia do dispositivo protético assim como o seu baixo peso e custo, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida e reabilitação de pessoas com deficiência.

Para análises futuras, sugere-se:

- melhorias no sistema de compensação dos dedos, para que seja realizado uma distribuição uniforme de força além de abranger o movimento do polegar;
- a troca dos cabos responsáveis por realizar a flexão dos dedos, uma vez que verificou-se que os mesmos deformam-se progressivamente a cada solicitação do motor;
- a forma de fixação dos cabos nas falanges distais dos dedos, visto que a mesma é ineficiente;
- a análise numérica do dispositivo.



---

## REFERÊNCIAS

---

3DPRINTINGFROMSCRATCH. *3D Printer Filament Types Overview*. 2017. Disponível em: <<http://3dprintingfromscratch.com/common/3d-printer-filament-types-overview/>>. Acesso em: 21/06/2017. Citado na página 38.

AHN, S.-H. *et al.* Anisotropic material properties of fused deposition modeling abs. *Rapid prototyping journal*, MCB UP Ltd, v. 8, n. 4, p. 248–257, 2002. Citado 7 vezes nas páginas 25, 33, 34, 55, 56, 57 e 60.

ALAIMO, G. *et al.* Influence of meso-structure and chemical composition on fdm 3d-printed parts. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, v. 113, p. 371–380, 2017. Citado na página 62.

ALVAREZ, L. K.; LAGOS, R. F.; AIZPUN, M. Investigating the influence of infill percentage on the mechanical properties of fused deposition modelled abs parts. *Ingeniería e Investigación*, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia., v. 36, n. 3, p. 110–116, 2016. Citado na página 55.

ANDO, M.; HODOSHIMA, J. A note on bootstrapped white's test for heteroskedasticity in regression models. *Economics Letters*, Elsevier, v. 97, n. 1, p. 46–51, 2007. Citado na página 103.

ARMSTRONG, C.; OLDHAM, J. A comparison of dominant and non-dominant hand strengths. *Journal of Hand Surgery*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 24, n. 4, p. 421–425, 1999. Citado na página 114.

ASSAN, A. E. *Resistência dos Materiais*. [S.l.]: Editora da Unicamp, 2010. v. 1. Nenhuma citação no texto.

ASTM:D638. *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. Astm d638. West Conshohocken, PA, 2014. Citado na página 61.

ASTM:F2792-12A. *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*. Astm f2792. West Conshohocken, PA, 2012. Citado na página 32.

AURAS, R.; HARTE, B.; SELKE, S. An overview of polylactides as packaging materials. *Macromolecular bioscience*, Wiley Online Library, v. 4, n. 9, p. 835–864, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 42.

BAILEY, J. *et al.* Evidence relating to object-oriented software design: A survey. In: IEEE. *Empirical Software Engineering and Measurement, 2007. ESEM 2007. First International Symposium on*. [S.l.], 2007. p. 482–484. Citado na página 28.

- BAYRAKTAR, m. *et al.* Experimental study on the 3d-printed plastic parts and predicting the mechanical properties using artificial neural networks. *Polymers for Advanced Technologies*, Wiley Online Library, v. 28, n. 8, p. 1044–1051, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 55, 58 e 60.
- BEER, F. P. *et al.* *Mecânica dos Materiais-7ª Edição*. [S.l.]: AMGH Editora, 2015. Nenhuma citação no texto.
- BERMAN, B. 3-d printing: The new industrial revolution. *Business horizons*, Elsevier, v. 55, n. 2, p. 155–162, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 31.
- BIASOTO, E.; MENDES, L. *Introdução a Polímeros*. [S.l.]: Edgard Blucher Ltda., São Paulo, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.
- BUDZIARECK, M. B.; DUARTE, R. R. P.; BARBOSA-SILVA, M. C. G. Reference values and determinants for handgrip strength in healthy subjects. *Clinical nutrition*, Elsevier, v. 27, n. 3, p. 357–362, 2008. Citado na página 114.
- BURN, M. B.; TA, A.; GOGOLA, G. R. Three-dimensional printing of prosthetic hands for children. *The Journal of hand surgery*, Elsevier, v. 41, n. 5, p. e103–e109, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 33, 34, 44 e 45.
- CALLEGARI-JACQUES, S. M. *Bioestatística: princípios e aplicações*. [S.l.]: Artmed, 2003. Citado na página 66.
- CANEVAROLO Jr., S. V. *Ciência dos polímeros*. [S.l.]: Artiliber editora, São Paulo, 2002. Citado 4 vezes nas páginas 35, 36, 37 e 38.
- CARRASCO, F. *et al.* Processing of poly (lactic acid): characterization of chemical structure, thermal stability and mechanical properties. *Polymer Degradation and stability*, Elsevier, v. 95, n. 2, p. 116–125, 2010. Citado 4 vezes nas páginas 41, 42, 43 e 44.
- CARVALHO, M. P. *Análise de tensões e deformações em estruturas termoplásticas usando o método de elementos finitos*. Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2007. Citado na página 35.
- CHANG, W.-J. *et al.* Development and testing of x-ray imaging-enhanced poly-l-lactide bone screws. *PloS one*, Public Library of Science, v. 10, n. 10, p. e0140354, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 59 e 60.
- CHEN, T.; ZHANG, W.; ZHANG, J. Alkali resistance of poly (ethylene terephthalate)(pet) and poly (ethylene glycol-co-1, 4-cyclohexanedimethanol terephthalate)(petg) copolyesters: The role of composition. *Polymer Degradation and Stability*, Elsevier, v. 120, p. 232–243, 2015. Nenhuma citação no texto.
- CHENG, C.-L.; GARG, G. *et al.* Coefficient of determination for multiple measurement error models. *Journal of Multivariate Analysis*, Elsevier, v. 126, p. 137–152, 2014. Citado na página 95.
- CHRISTIYAN, K. J.; CHANDRASEKHAR, U.; VENKATESWARLU, K. A study on the influence of process parameters on the mechanical properties of 3d printed abs composite. In: IOP PUBLISHING. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. [S.l.], 2016. v. 114, n. 1, p. 012109. Citado 6 vezes nas páginas 25, 26, 33, 34, 59 e 60.

COSTA, R.; OLIVEIRA, F. Mensuração da força de preensão palmar em atletas de jiu-jitsu. In: *VII Congresso Goiano de Ciências do Esporte*. [S.l.: s.n.], 2011. Citado na página 114.

CROCCOLO, D.; AGOSTINIS, M. D.; OLMI, G. Experimental characterization and analytical modelling of the mechanical behaviour of fused deposition processed parts made of abs-m30. *Computational Materials Science*, Elsevier, v. 79, p. 506–518, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 55, 56 e 60.

DAKPA, R.; HEGER, H. Prosthetic management and training of adult upper limb amputees. *Current Orthopaedics*, Elsevier, v. 11, n. 3, p. 193–202, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 47.

DATTA, R.; HENRY, M. Lactic acid: recent advances in products, processes and technologies—a review. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, Wiley Online Library, v. 81, n. 7, p. 1119–1129, 2006. Citado na página 41.

DAWOUD, M.; TAHA, I.; EBEID, S. J. Mechanical behaviour of abs: An experimental study using fdm and injection moulding techniques. *Journal of Manufacturing Processes*, Elsevier, v. 21, p. 39–45, 2016. Citado na página 38.

DICHTL, C.; SIPPEL, P.; KROHNS, S. Dielectric properties of 3d printed polylactic acid. *Advances in Materials Science and Engineering*, Hindawi, v. 2017, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 60.

DORGAN, J. R.; LEHERMEIER, H.; MANG, M. Thermal and rheological properties of commercial-grade poly (lactic acid) s. *Journal of Polymers and the Environment*, Springer, v. 8, n. 1, p. 1–9, 2000. Citado na página 43.

DRUMRIGHT, R. E.; GRUBER, P. R.; HENTON, D. E. Polylactic acid technology. *Advanced materials*, Wiley Online Library, v. 12, n. 23, p. 1841–1846, 2000. Citado 3 vezes nas páginas 41, 42 e 43.

DUPAIX, R. B.; BOYCE, M. C. Finite strain behavior of poly (ethylene terephthalate)(pet) and poly (ethylene terephthalate)-glycol (petg). *Polymer*, Elsevier, v. 46, n. 13, p. 4827–4838, 2005. Nenhuma citação no texto.

ENABLINGTHEFUTURE.ORG. *Enabling The Future*. 2017. Disponível em: <<http://enablingthefuture.org/>>. Acesso em: 19/06/2017. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 48.

FERNANDES, L. F. R. M. *et al.* Correlações entre força de preensão manual e variáveis antropométricas da mão de jovens adultos. *Fisioterapia e Pesquisa*, v. 18, n. 2, p. 151–156, 2011. Citado na página 114.

GARLOTTA, D. A literature review of poly (lactic acid). *Journal of Polymers and the Environment*, Springer, v. 9, n. 2, p. 63–84, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 43.

GOH, J.; LEE, P.; NG, P. Structural integrity of polypropylene prosthetic sockets manufactured using the polymer deposition technique. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 216, n. 6, p. 359–368, 2002. Citado na página 46.

GONÇALVES, G. H. *et al.* Força de preensão palmar e pinça digital em diferentes grupos de pilotos da academia da força aérea brasileira. *Fisioterapia e Pesquisa*, v. 17, n. 2, p. 141–146, 2010. Citado na página 114.

- GONZALEZ, R. *Data analysis for experimental design*. Nova Iorque: Guilford Press, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 66 e 67.
- GRIFFITHS, C. *et al.* Effect of build parameters on processing efficiency and material performance in fused deposition modelling. *Procedia CIRP*, Elsevier, v. 49, p. 28–32, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 57, 58 e 60.
- GROTH, C. *et al.* Three-dimensional printing technology. *J Clin Orthod*, v. 48, n. 8, p. 475–85, 2014. Citado na página 31.
- GU, S. *et al.* Synthesis and characterization of biodegradable lactic acid-based polymers by chain extension. *Polymer International*, Wiley Online Library, v. 57, n. 8, p. 982–986, 2008. Citado na página 41.
- GÜNTHER, C. M. *et al.* Grip strength in healthy caucasian adults: reference values. *Journal of Hand Surgery*, Elsevier, v. 33, n. 4, p. 558–565, 2008. Citado na página 114.
- GUPTA, A.; KUMAR, V. New emerging trends in synthetic biodegradable polymers—polylactide: A critique. *European polymer journal*, Elsevier, v. 43, n. 10, p. 4053–4074, 2007. Citado na página 43.
- GUPTA, B.; REVAGADE, N.; HILBORN, J. Poly (lactic acid) fiber: an overview. *Progress in polymer science*, Elsevier, v. 32, n. 4, p. 455–482, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 41, 42 e 43.
- HARADA, J.; WIEBECK, H. Plásticos de engenharia-tecnologia e aplicações. São Paulo, SP: Ed. Artliber Ltda, 2005. Citado 3 vezes nas páginas 38, 39 e 40.
- HIBBELER, R. C. *Resistência dos materiais*. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. Nenhuma citação no texto.
- HULL, C. W. The birth of 3d printing. *Research-Technology Management*, Taylor & Francis, v. 58, n. 6, p. 25–30, 2015. Citado na página 31.
- IVANOVA, O.; WILLIAMS, C.; CAMPBELL, T. Additive manufacturing (am) and nanotechnology: promises and challenges. *Rapid Prototyping Journal*, Emerald Group Publishing Limited, v. 19, n. 5, p. 353–364, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- JÜRIMÄE, T.; HURBO, T.; JÜRIMÄE, J. Relationship of handgrip strength with anthropometric and body composition variables in prepubertal children. *HOMO-Journal of Comparative Human Biology*, Elsevier, v. 60, n. 3, p. 225–238, 2009. Citado na página 114.
- KIM, N.-H.; SANKAR, B. *Introdução à análise e ao projeto em elementos finitos*. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2011. Nenhuma citação no texto.
- KUMAR, T. N. *et al.* Effects of electroplating on the mechanical properties of fdm-pla parts. *i-Manager's Journal on Future Engineering and Technology*, iManager Publications, v. 10, n. 3, p. 29, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 57.
- KURZ-KIM, J.-R.; LORETAN, M. On the properties of the coefficient of determination in regression models with infinite variance variables. *Journal of Econometrics*, Elsevier, v. 181, n. 1, p. 15–24, 2014. Citado na página 95.
- LASPRILLA, A. J. *et al.* Poly-lactic acid synthesis for application in biomedical devices—a review. *Biotechnology advances*, Elsevier, v. 30, n. 1, p. 321–328, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 43.

- LEE, B.; ABDULLAH, J.; KHAN, Z. Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible abs object. *Journal of materials processing technology*, Elsevier, v. 169, n. 1, p. 54–61, 2005. Citado 4 vezes nas páginas 25, 34, 35 e 55.
- LEE, C. *et al.* Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts. *Journal of materials processing technology*, Elsevier, v. 187, p. 627–630, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 56 e 60.
- LEVENHAGEN, N. P.; DADMUN, M. D. Bimodal molecular weight samples improve the isotropy of 3d printed polymeric samples. *Polymer*, Elsevier, v. 122, p. 232–241, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 55, 59 e 60.
- LI, K. *et al.* Predicting maximal grip strength using hand circumference. *Manual therapy*, Elsevier, v. 15, n. 6, p. 579–585, 2010. Citado na página 114.
- LIM, L.-T.; AURAS, R.; RUBINO, M. Processing technologies for poly (lactic acid). *Progress in polymer science*, Elsevier, v. 33, n. 8, p. 820–852, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 41, 42 e 43.
- LOPES, J. *et al.* Reference equations for handgrip strength: Normative values in young adult and middle-aged subjects. *Clinical Nutrition*, Elsevier, 2017. Citado na página 114.
- LUNSFORD, C. *et al.* Innovations with 3-dimensional printing in physical medicine and rehabilitation: A review of the literature. *PM&R*, Elsevier, v. 8, n. 12, p. 1201–1212, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 31, 45, 46 e 47.
- LUNT, J. Large-scale production, properties and commercial applications of polylactic acid polymers. *Polymer degradation and stability*, Elsevier, v. 59, n. 1-3, p. 145–152, 1998. Citado 3 vezes nas páginas 41, 42 e 43.
- LUNT, J.; SHAFER, A. L. Polylactic acid polymers from com. applications in the textiles industry. *Journal of Coated Fabrics*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 29, n. 3, p. 191–205, 2000. Citado na página 41.
- MASON, R. L.; GUNST, R. F.; HESS, J. L. *Statistical design and analysis of experiments: with applications to engineering and science*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2003. v. 474. Citado 2 vezes nas páginas 66 e 67.
- MATTIOLI, F. E. R. *et al.* Utilização de técnicas de realidade virtual na simulação de próteses de mão. Universidade Federal de Uberlândia, 2012. Citado na página 47.
- MOURA, P. M. d. L. e. S. *Estudo da força de preensão palmar em diferentes faixas etárias do desenvolvimento humano*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 114, 115 e 116.
- MUKAKA, M. M. A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. *Malawi Medical Journal*, Medical Association of Malawi, v. 24, n. 3, p. 69–71, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 101 e 102.
- MUÑOZ, G. A. D. *et al.* *Estudio de validez diagnóstico: consistencia del dinamómetro de mano digital Camry en una población de adultos sanos en Bogotá*. Tese (Doutorado) — Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá, 2016. Citado na página 116.
- MURARIU, M.; DUBOIS, P. Pla composites: From production to properties. *Advanced drug delivery reviews*, Elsevier, v. 107, p. 17–46, 2016. Citado na página 41.

- NAMPOOTHIRI, K. M.; NAIR, N. R.; JOHN, R. P. An overview of the recent developments in polylactide (pla) research. *Bioresource technology*, Elsevier, v. 101, n. 22, p. 8493–8501, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 42.
- NAPIER, J. R. The prehensile movements of the human hand. *Bone & Joint Journal*, Bone and Joint Journal, v. 38, n. 4, p. 902–913, 1956. Citado na página 113.
- NEDER, M. Implicações psicológicas nas cirurgias de mão. *Revista Brasileira de Enfermagem*, SciELO Brasil, v. 26, n. 3, p. 209–213, 1973. Citado na página 47.
- NOGUEIRA, K. L. *et al.* O uso de técnicas de realidade virtual e aumentada na simulação de prótese de membros superiores. Universidade Federal de Uberlândia, 2007. Citado na página 47.
- NORMAN, K. *et al.* Hand grip strength: outcome predictor and marker of nutritional status. *Clinical nutrition*, Elsevier, v. 30, n. 2, p. 135–142, 2011. Citado na página 114.
- ONWUBOLU, G. C.; RAYEGANI, F. Characterization and optimization of mechanical properties of abs parts manufactured by the fused deposition modelling process. *International Journal of Manufacturing Engineering*, Hindawi Publishing Corporation, v. 2014, 2014. Citado 6 vezes nas páginas 25, 34, 35, 56, 58 e 60.
- PAOLI, M. A. D. *Degradação e estabilização de polímeros*. [S.l.]: Artliber São Paulo, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.
- PEZZIN, L. E. *et al.* Use and satisfaction with prosthetic limb devices and related services 1. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, Elsevier, v. 85, n. 5, p. 723–729, 2004. Citado na página 47.
- QUENTAL, A. C. *et al.* *Blendas de PHB e PETG: Formação de um copoliéster aromático/alifático via processamento reativo*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, 2004. Nenhuma citação no texto.
- RASAL, R. M.; JANORKAR, A. V.; HIRT, D. E. Poly (lactic acid) modifications. *Progress in polymer science*, Elsevier, v. 35, n. 3, p. 338–356, 2010. Citado na página 42.
- RESNIK, L. *et al.* Advanced upper limb prosthetic devices: implications for upper limb prosthetic rehabilitation. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, Elsevier, v. 93, n. 4, p. 710–717, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 47.
- RIBOM, E. L. *et al.* Population-based reference values of handgrip strength and functional tests of muscle strength and balance in men aged 70–80 years. *Archives of gerontology and geriatrics*, Elsevier, v. 53, n. 2, p. e114–e117, 2011. Citado na página 114.
- RILEY, W. F.; STURGES, L. D.; MORRIS, D. H. *Mecânica dos materiais*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015. Nenhuma citação no texto.
- SANTOS, L. B.; MONTEIRO, R.; CARNEIRO, T. Desenvolvimento de inteligência artificial para prótese de mão humana produzida em impressora 3d. In: *Workshop de Gestão, Tecnologia Industrial e Modelagem Computacional*. [S.l.: s.n.], 2015. v. 1, n. 1. Citado na página 47.
- SAWYER, D. J. Bioprocessing—no longer a field of dreams. In: WILEY ONLINE LIBRARY. *Macromolecular Symposia*. [S.l.], 2003. v. 201, n. 1, p. 271–282. Citado na página 41.

SCHLÜSSEL, M. M. *et al.* Reference values of handgrip dynamometry of healthy adults: a population-based study. *Clinical Nutrition*, Elsevier, v. 27, n. 4, p. 601–607, 2008. Citado na página 114.

SILVA, K. *et al.* Three-dimensional (3-d) printing: a cost-effective solution for improving global accessibility to prostheses. *PM&R*, Elsevier, v. 7, n. 12, p. 1312–1314, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 31, 44, 45 e 46.

SPRUIT, M. A. *et al.* New normative values for handgrip strength: results from the uk biobank. *Journal of the American Medical Directors Association*, Elsevier, v. 14, n. 10, p. 775–e5, 2013. Citado na página 114.

STOPPA, M. H. *et al.* Design and development of a bionic hand prosthesis. In: SPRINGER. *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*. [S.l.], 2017. p. 518–528. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 51.

STRATASYS. *FDM Thermoplastics*. 2017. Disponível em: <<http://www.stratasys.com/materials/fdm>>. Acesso em: 20/06/2017. Citado na página 38.

TIMOSHENKO, S. *Resistência dos materiais*. [S.l.]: Ao livro técnico, 1958. v. 1. Nenhuma citação no texto.

TORRADO, A. R. *et al.* Characterizing the effect of additives to abs on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3d printing. *Additive Manufacturing*, Elsevier, v. 6, p. 16–29, 2015. Citado 5 vezes nas páginas 25, 26, 55, 59 e 60.

TORRES, J. *et al.* An approach for mechanical property optimization of fused deposition modeling with polylactic acid via design of experiments. *Rapid Prototyping Journal*, Emerald Group Publishing Limited, v. 22, n. 2, p. 387–404, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 60.

TYMRAK, B.; KREIGER, M.; PEARCE, J. M. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-d printers under realistic environmental conditions. *Materials & Design*, Elsevier, v. 58, p. 242–246, 2014. Citado 6 vezes nas páginas 26, 38, 46, 55, 57 e 60.

VIANA, D. D.; FORMOSO, C. T.; KALSAAS, B. T. Waste in construction: a systematic literature review on empirical studies. In: *ANNUAL CONFERENCE OF INTERNATIONAL GROUP OF LEAN CONSTRUCTION*. [S.l.: s.n.], 2012. v. 20. Citado na página 28.

VINK, E. T. *et al.* The sustainability of natureworks™ polylactide polymers and ingeo™ polylactide fibers: an update of the future. *Macromolecular Bioscience*, Wiley Online Library, v. 4, n. 6, p. 551–564, 2004. Citado na página 42.

\_\_\_\_\_. Applications of life cycle assessment to natureworks™ polylactide (pla) production. *Polymer Degradation and stability*, Elsevier, v. 80, n. 3, p. 403–419, 2003. Citado 3 vezes nas páginas 41, 42 e 43.

VOLPATO, N.; FOGGIATTO, J. A.; SCHWARZ, D. C. The influence of support base on fdm accuracy in z. *Rapid Prototyping Journal*, Emerald Group Publishing Limited, v. 20, n. 3, p. 182–191, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.

WHITE, H. A heteroskedasticity-consistent covariance matrix estimator and a direct test for heteroskedasticity. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, JSTOR, p. 817–838, 1980. Citado na página 103.

WITTBRODT, B.; PEARCE, J. M. The effects of pla color on material properties of 3-d printed components. *Additive Manufacturing*, Elsevier, v. 8, p. 110–116, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 25, 55, 57 e 60.

WRIGHT, T. W.; HAGEN, A. D.; WOOD, M. B. Prosthetic usage in major upper extremity amputations. *The Journal of hand surgery*, Elsevier, v. 20, n. 4, p. 619–622, 1995. Citado na página 45.

WU, W. *et al.* Influence of layer thickness, raster angle, deformation temperature and recovery temperature on the shape-memory effect of 3d-printed polylactic acid samples. *Materials*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 8, p. 970, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 60.

YOUNG, V. L. *et al.* Fluctuation in grip and pinch strength among normal subjects. *Journal of Hand Surgery*, Elsevier, v. 14, n. 1, p. 125–129, 1989. Citado na página 114.

YU, W. W. *et al.* Incorporation of graphitic nano-filler and poly (lactic acid) in fused deposition modeling. *Journal of Applied Polymer Science*, Wiley Online Library, v. 134, n. 15, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 59 e 60.

## APÊNDICE A

---

# Roteiro de Impressão dos Corpos de Prova

---

### Etapa 1: Preparação da Base de Impressão

Passo 1: Lave cuidadosamente o vidro da base de impressão.

Passo 2: Seque o vidro, com guardanapo ou pano apropriado.

Passo 3: Passe um pano umedecido com álcool no vidro para eliminar resíduos. Certifique-se de não ter contato com a face do vidro já limpa com álcool.

Passo 4: Espere secar.

Passo 5: Borrife uma camada de spray de fixação extraforte na face do vidro já limpa com álcool.

Passo 6: Prenda o vidro à base de impressão (use presilhas). Certifique-se de que o vidro esteja firmemente preso, de modo a evitar deslocamentos durante o procedimento de impressão.

### Etapa 2: Configuração da Impressora

Passo 1: Defina qual o *software* que efetuará a divisão do objeto em camadas (Cura, Slic3r, Seingforge).

Passo 2: Definir os valores para os parâmetros de impressão.

Passo 3: Após definir os parâmetros de impressão, salve as configurações determinadas.

### Etapa 3: Fatiamento do Objeto

Passo 1: Abra o arquivo .STL no fatiador selecionado.

Passo 2: Posicione a peça na base de impressão.

Passo 3: Rotacione o objeto para a forma mais conveniente possível para a impressão.

Passo 4: Defina a escala do arquivo a ser impresso.

Passo 5: Selecione a configuração salva na etapa anterior (Seção A).

Passo 6: Em seguida, selecione a opção “SLICER” para fatiar o objeto.

#### **Etapa 4:** Preparação para Impressão

Passo 1: Coloque o carretel do filamento desejado no suporte próprio.

Passo 2: Conecte o fio de material no extrusor.

Passo 3: Retorne ao fatiador e inicie o processo de aquecimento da base e do bico extrusor.

Passo 4: Quando o bico extrusor e a base de impressão atingirem a temperatura requerida, inicie o processo de extrusão do material, até atingir uniformidade.

Passo 5: Inicie o processo de impressão do objeto.

#### **Etapa 5:** Término da Impressão

Passo 1: Após a conclusão da peça, desligue a mesa de impressão e o bico extrusor.

Passo 2: Aguarde a mesa atingir a temperatura ambiente.

Passo 3: Retire a peça.

Passo 4: Se necessário utilize ferramentas para a remoção do suporte.

#### **Etapa 6:** Identificação do Objeto Confeccionado

Após o término da peça, identifique-o e guarde-o conforme especificações próprias do material ou do objeto.