

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**GUILHERME GUMZ FELICIONI**  
**JULIO TEIXEIRA BOJAN**

**PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA DE ANÁLISE ESTATÍSTICA DE  
UM BANCO DE DADOS DE MANUFATURA ADITIVA PARA  
DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO 3D NA  
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CURITIBA**

**2021**

**GUILHERME GUMZ FELICIONI**  
**JULIO TEIXEIRA BOJAN**

**PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA DE ANÁLISE ESTATÍSTICA DE UM BANCO  
DE DADOS DE MANUFATURA ADITIVA PARA DETERMINAÇÃO DOS  
PARÂMETROS DE IMPRESSÃO 3D NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO**

**Proposal of statistical analysis methodology for an additive manufacturing  
database for the definition of 3D printing parameters**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
como requisito para obtenção do título de Bacharel  
em Engenharia Mecânica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Profa. Dra. Cleina Yayoe Okoshi.

**CURITIBA**

**2021**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



---

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa Proposta de uma Metodologia de Análise Estatística de um Banco de Dados de Manufatura Aditiva para Determinação dos Parâmetros de Impressão 3D na Resistência à Tração, realizado pelos alunos Guilherme Gumz Felicioni e Julio Teixeira Bojan, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2, do curso de Engenharia Mecânica, do Departamento Acadêmico de Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dra., Cleina Yayoe Okoshi  
DAMEC, UTFPR  
Orientadora

Prof. Dr., Leandro Magatão  
DAMEC, UTFPR  
Avaliador

Prof. Dr., Osvaldo Verussa Junior  
DAMEC, UTFPR  
Avaliador

Curitiba, 27 de agosto de 2021

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Secretaria do Programa

Dedicamos esse trabalho aos nossos familiares,  
Oswaldo Pereira Bojan,  
Margarida Vitória Pereira Bojan e  
Osmar Gumz, que puderam acompanhar  
apenas parte dessa jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

A graduação, como importante parte das nossas vidas, expandiu nossas visões de mundo e nos fez crescer como pessoas e profissionais. Muitos ajudaram nesse processo e esse trabalho não poderia ser entregue sem esse suporte.

Primeiramente às nossas famílias, que nos apoiaram em quaisquer momentos de dificuldades.

Aos colegas de turma que se tornaram amigos, que fizeram essa jornada mais leve e prazerosa.

À nossa orientadora Professora Doutora Cleina Yayoe Okoshi, por todos os conselhos, compartilhamento de experiência, correções e caminhos mostrados.

À Ovenbird, empresa de nossos amigos que possibilitou a impressão 3D dos corpos de prova.

Ao Professor Euclides Alexandre Bernardelli, que gentilmente nos orientou para a realização dos ensaios de tração.

Por fim, à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, local no qual toda essa breve história aconteceu.

## RESUMO

Felicioni, Guilherme Gumz; Bojan, Julio Teixeira. Proposta de uma Metodologia de Análise Estatística de um Banco de Dados de Manufatura Aditiva para Determinação dos Parâmetros de Impressão 3D na Resistência à Tração. 88 f. Trabalho de Conclusão de Curso - TCC, Bacharelado em Engenharia Mecânica, Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Curitiba, 2021.

A quarta revolução industrial, também chamada de indústria 4.0, é um conceito moderno que vem revolucionando a forma de comunicação entre todos os componentes de um processo produtivo. Essa revolução tem base em diversas tecnologias, buscando inovação com geração de novos modelos de negócios e otimização de processos produtivos, centrados sempre em competitividade e agilidade. Nesse contexto, *Big Data e Analytics* se destaca por permitir geração de informação com potencial de suportar tomada de decisões nos diversos níveis das empresas. Outra tecnologia relevante é a Manufatura Aditiva, capaz de fabricar peças com a adição de material, tendo diferentes processos, materiais e parâmetros de impressão, capazes de alterar benéficamente ou não a resistência mecânica das peças produzidas. O presente trabalho tem como objetivo propor uma metodologia de análise estatística, em um banco de dados de impressão 3D, para determinar a influência dos parâmetros de impressão na resistência máxima à tração em uma peça fabricada com modelagem por fusão e deposição, tecnologia de impressão 3D. A análise escolhida foi a Regressão Linear Múltipla, avaliando os parâmetros de altura de camada, espessura de parede, densidade de preenchimento, padrão de preenchimento, temperatura de bico, temperatura de mesa e velocidade de impressão, sendo que somente os três primeiros foram identificados como significativos e com um resultado de coeficiente de determinação de 78,05%. Para a avaliação empírica das equações de regressão encontradas, foram realizados ensaios de tração com 18 corpos de prova, de ABS e PLA, projetados conforme a norma ASTM D 638-02a e impressos em 3D. Os ensaios foram realizados utilizando uma máquina de ensaio universal EMIC DL-200 e seus resultados comprovaram os indicadores do procedimento estatístico.

**Palavras-chave:** Análise de dados. Manufatura Aditiva. Análise estatística. Parâmetros de impressão 3D. Resistência à tração.

## ABSTRACT

Felicioni, Guilherme Gumz; Bojan, Julio Teixeira. Proposal of a Statistical Analysis Methodology for an Additive Manufacturing Database for the Determination of 3D Printing Parameters for the Tensile Strength. 88 f. Undergraduate Thesis, Mechanical Engineering, Academic Department of Mechanical, Federal University of Technology - Parana (UTFPR). Curitiba, 2021.

The fourth industrial revolution, also called industry 4.0, is a modern concept that has revolutionized the way of communication between all components of a production process. This revolution is based on several technologies, looking for innovation with the generation of new business models and optimization of production processes, always centered on competitiveness and agility. In this context, Big Data and Analytics stands out for allowing the generation of information with the potential to support decision-making at different levels of companies. Another relevant technology is Additive Manufacturing, capable of manufacturing parts with the addition of material, having different processes, materials and printing parameters, capable of changing beneficially or not the mechanical resistance of the produced parts. The present research aims to propose a statistical analysis methodology, in a 3D printing database, to determine the influence of printing parameters on the maximum tensile strength in a part manufactured with fusion and deposition modeling, a 3D printing technology. The analysis chosen was the Multiple Linear Regression, evaluating the parameters of layer height, wall thickness, infill density, infill pattern, nozzle temperature, table temperature and printing speed, being that only the first three were identified as significant and with a result of the coefficient of determination of 78.05%. For the empirical evaluation of the regression equations found, tensile strength tests were performed with 18 specimens, made of ABS and PLA, designed according to ASTM D 638-02a and printed in 3D. The tests were performed by a universal testing machine EMIC DL-200 and their results confirmed those indicators of the statistical procedure.

**Keywords:** Data analysis. Additive Manufacturing. Statistics analysis. 3D printing parameters. Tensile strength.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Nove tecnologias que transformarão a produção industrial .....	19
Figura 2 - Etapas do processo de fabricação por MA .....	22
Figura 3 - Modelagem por fusão e deposição .....	23
Figura 4 - Efeito banho de vapor de acetona em uma peça de ABS.....	24
Figura 5 - Efeito do aumento da altura de camada .....	26
Figura 6 - Espessura de parede .....	27
Figura 7 - Densidade de preenchimento .....	28
Figura 8 - Principais padrões de preenchimento .....	29
Figura 9 - Diagrama tensão-deformação de um aço típico de estruturas.....	31
Figura 10 - Curvas tensão-deformação em diferentes materiais.....	31
Figura 11 - 5 Vs do Big Data .....	33
Figura 12 - Seleção de uma técnica de análise multivariada .....	38
Figura 13 - Gráfico de pareto dos efeitos padronizados.....	42
Figura 14 - Gráfico de resíduos versus de ajustes .....	43
Figura 15 - Gráfico de resíduos versus ordem .....	44
Figura 16 - Gráfico de probabilidade normal .....	44
Figura 17 - Fluxograma da metodologia.....	46
Figura 18 - Geometria do corpo de prova .....	49
Figura 19 - Equipamento de ensaios universal EMIC DL-2000.....	50
Figura 20 - Impressora 3D utilizada .....	51
Figura 21 - Filamento de PLA.....	51
Figura 22 - Modelo 3D do CP.....	54
Figura 23 - Fluxograma do procedimento de análise .....	57
Figura 24 - Categoria das variáveis na regressão.....	58
Figura 25 - Gráfico de Pareto da primeira regressão .....	59
Figura 26 - Gráficos de Resíduo de Tensão última na 2ª iteração .....	60
Figura 27 - Gráficos de Resíduo de Tensão última na 3ª iteração .....	60
Figura 28 - Gráfico de Pareto do resultado final.....	62
Figura 29 - Gráfico de resíduos versus de ajustes do modelo final.....	63
Figura 30 - Gráfico de resíduos versus ordem do modelo final.....	64
Figura 31 - Gráfico de probabilidade normal do modelo final .....	64
Figura 32 - Erro de impressão.....	69
Figura 33 - Ensaio de tração realizado.....	69
Figura 34 – Possível concentrador de tensão no CP 4B .....	70
Figura 35 - CPs ensaiados .....	70
Figura 36 - Tensão x Deformação CP 7A .....	71

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Limitação na escolha dos parâmetros de impressão 3D .....	52
Quadro 2 - Intervalo de cada parâmetro de impressão .....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Materiais e métodos de impressão 3D .....	20
Tabela 2 - Dimensões do corpo de prova .....	49
Tabela 3 - Parâmetros de impressão 3D.....	53
Tabela 4 - Estatísticas descritivas .....	55
Tabela 5 - Estatísticas descritivas do banco de dados normalizado .....	56
Tabela 6 - Valor-p das variáveis .....	61
Tabela 7 - Tensões Últimas Previstas.....	65
Tabela 8 - Material e tempo gastos de impressão 3D .....	67
Tabela 9 - Medidas da seção útil do CP de ensaio .....	68
Tabela 10 - Resultados ensaio de tração .....	72
Tabela 11 - Resultados dos ensaios e das previsões .....	72
Tabela 12 - Influência da temperatura de bico, temperatura de mesa e velocidade de impressão.....	73

## LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

### LISTA DE SIGLAS

3D	Três Dimensões
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CP	Corpo de Prova
CPS	<i>Cyber-Physical Systems</i>
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
IA	Inteligência Artificial
IoT	<i>Internet of Things</i>
MA	Manufatura Aditiva
PLA	Poli Ácido Láctico
PR	Prototipagem Rápida
STL	<i>Surface Tessellation Language</i>
TI	Tecnologia da Informação
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

### LISTA DE ACRÔNIMOS

CAD *Computer-Aided Design*

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1 OBJETIVOS .....	15
1.1.1 Objetivo Geral .....	15
1.1.2 Objetivos Específicos .....	15
1.2 JUSTIFICATIVA .....	16
1.3 DESCRIÇÕES DAS SEÇÕES .....	16
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>18</b>
2.1 INDÚSTRIA 4.0 .....	18
2.2 MANUFATURA ADITIVA .....	19
2.3 MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO .....	21
2.4 MATERIAIS DE IMPRESSÃO .....	24
2.4.1 Acrilonitrila Butadieno Estireno .....	24
2.4.2 Poli Ácido Lático .....	25
2.5 PARÂMETROS DE IMPRESSÃO .....	25
2.5.1 Altura de Camada .....	26
2.5.2 Espessura de Parede .....	27
2.5.3 Densidade de Preenchimento .....	28
2.5.4 Padrão de Preenchimento .....	28
2.5.5 Temperatura de Bico e Mesa e Velocidade de Impressão .....	29
2.6 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO .....	30
2.7 BIG DATA .....	32
2.8 DATA ANALYTICS .....	34
2.9 TRANSFORMAÇÃO DE DADOS .....	35
2.10 ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA .....	36
2.10.1 Conceitos Básicos da Análise Multivariada .....	37
2.10.2 Definição da Análise Estatística Multivariada Adequada .....	37
2.11 REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA .....	39
2.11.1 Interpretação dos Principais Resultados de um Modelo de Regressão .....	42
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>46</b>
3.1 METODOLOGIA GERAL .....	46
3.1.1 Revisão Bibliográfica dos Conteúdos .....	46
3.1.2 Identificação da Base de Dados de Impressão 3D .....	47
3.1.3 Escolha da Análise Estatística a Ser Utilizada .....	47

3.1.4 Treinamento Para Utilização dos Softwares de Análise Estatística .....	47
3.1.5 Desenvolvimento do Procedimento Para Análise da Base de Dados .....	47
3.1.6 Aplicação do Procedimento na Base de Dados .....	48
3.1.7 Análise Geral e Estatística dos Resultados Encontrados .....	48
3.1.8 Validação Prática dos Resultados com Testes de Tração .....	48
3.2 MATERIAIS E MÉTODOS PARA ENSAIO DE TRAÇÃO .....	48
3.2.1 Corpos de Prova para Ensaio .....	48
3.2.2 Equipamento para Ensaio de Tração .....	50
3.3 MATERIAIS E MÉTODOS IMPRESSÃO 3D .....	50
3.3.1 Material de impressão .....	51
3.3.2 Parâmetros de impressão 3D .....	52
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>55</b>
4.1 IDENTIFICAÇÃO E PREPARAÇÃO DO BANCO DE DADOS .....	55
4.2 PROCEDIMENTO DE ANÁLISE .....	56
4.3 RESULTADOS DO PROCEDIMENTO DE ANÁLISE .....	61
4.3.1 Aplicação das Equações de Regressão .....	65
4.4 RESULTADO DO PROCEDIMENTO DE IMPRESSÃO 3D .....	67
4.4.1 Problemas de impressão .....	68
4.5 RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO .....	69
4.5.1 Comparação com as tensões máximas previstas .....	72
4.5.2 Influência das temperaturas do bico e mesa e velocidade de impressão ..	73
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>74</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>75</b>
<b>APÊNDICE A - DESENHO TÉCNICO DOS CORPOS DE PROVA .....</b>	<b>78</b>
<b>APÊNDICE B - BASE DE DADOS DE IMPRESSÃO 3D .....</b>	<b>79</b>
<b>APÊNDICE C - BASE DE DADOS DE IMPRESSÃO 3D NORMALIZADA .....</b>	<b>80</b>
<b>APÊNDICE D - GRÁFICOS TENSÃO x DEFORMAÇÃO .....</b>	<b>81</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, vivemos uma revolução tecnológica que muda a sociedade em todas as suas camadas, incluindo a forma com a qual as pessoas se expressam, comunicam, divertem-se e produzem. Há uma fusão do mundo físico, digital e biológico, com possibilidades ilimitadas decorrentes de milhões de usuários conectados à numerosas tecnologias, incluindo, por exemplo, inteligência artificial (IA), robótica, *internet of things* (IoT), veículos autônomos, biotecnologia e manufatura aditiva (SCHWAB, 2016).

Segundo Coelho (2016), na indústria, essa revolução é representada pela indústria 4.0, que tem seu impacto muito além da simples digitalização. A inovação nas fábricas inteligentes é baseada na combinação de múltiplas tecnologias inovadoras, o que muda o paradigma produtivo e força as organizações a repensarem seu modelo operacional objetivando rapidez, agilidade e competitividade.

Para gerar decisões mais assertivas com otimização de produção, deve-se associar IoT com Sistemas Físicos-Cibernéticos (CPS - *Cyber-Physical Systems*) e *Big Data*. Este permite, através de modelos matemáticos aplicados em enormes volumes de dados, determinar probabilidades que, por sua vez, permitem tomadas de decisão sem necessariamente conhecer os efeitos de causa (ALBERTIN, 2017).

Outra tecnologia importante na indústria 4.0, segundo Groover (2017), é a Manufatura Aditiva (MA). Também chamada de impressão 3D, ela é utilizada na prototipagem rápida (PR) como tecnologia capaz de produzir protótipos de engenharia reduzindo ao mínimo os prazos de entrega com base no modelo em CAD (*Computer-Aided Design*) do item. Para produção, são necessárias ferramentas computacionais para desenvolver o modelo em CAD e um hardware, como impressora 3D, para fabricação a partir de parâmetros pré-programados (SANTOS *et al.*, 2018).

As propriedades físicas de uma peça produzida por MA com extrusão de filamento fundido são anisotrópicas<sup>1</sup>, o que faz com que protótipos, mesmo produzidos com materiais tipicamente resistentes, se mostrem frágeis especialmente em casos de esforços de tração. Essa característica é possivelmente o maior problema da tecnologia, pois dificulta muito a aplicação de peças nas quais são aplicadas cargas (SAMPAIO, 2017).

---

<sup>1</sup> Que apresenta propriedades com valores diferentes dependendo da direção em que elas são avaliadas.

Segundo a Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2016), no Brasil, a implementação da indústria 4.0 ainda está abaixo do esperado, sendo que somente 63% das grandes empresas e 25% das pequenas utilizam ao menos uma das tecnologias da indústria 4.0, com uma média de utilização em 48% no total de empresas avaliadas. Assim, é de suma importância promover esse desenvolvimento no território nacional, uma vez que o uso de alta tecnologia aumenta a capacidade e eficiência produtiva de todos os processos, gerando otimização de recursos e benefícios financeiros (SAKURAI; ZUCHI, 2018).

## 1.1 OBJETIVOS

Os objetivos foram divididos em objetivo geral e objetivos específicos, apresentados a seguir.

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é propor uma metodologia para determinar a influência dos parâmetros de impressão na resistência máxima à tração de uma peça fabricada por MA, por meio da análise estatística de um banco de dados de manufatura aditiva.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos que devem ser cumpridos para que seja possível alcançar o objetivo geral são:

- Identificar as ferramentas estatísticas necessárias para a metodologia de análise;
- Selecionar uma base de dados (*Big Data*) de manufatura aditiva;
- Aplicar as ferramentas estatísticas conforme metodologia na base de dados selecionada;
- Analisar os resultados da análise estatística;
- Produzir corpos de prova (CPs) impressos em 3D;
- Validar os resultados da metodologia proposta com a realização de um ensaio de tração.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Diante da quarta revolução industrial associada à indústria 4.0, é de suma importância que suas tecnologias sejam bem entendidas e exploradas pelos profissionais ligados à indústria. Portanto, o presente trabalho é uma oportunidade de estudar e aplicar conceitos como *Big Data*, IoT, impressão 3D e análise estatística, que são utilizadas na indústria 4.0.

Com a competitividade no mundo atual, a tomada de decisão ágil e correta deve ser baseada em informações. Quando essa decisão define mudanças em processos de manufatura, uma das fontes mais importantes de informação decorre da análise dos dados gerados e coletados no processo.

No caso específico da impressão 3D em polímeros, os parâmetros adotados no processo de manufatura podem influenciar nas propriedades mecânicas da peça produzida, como a resistência à tração. Assim, buscando quantificar essa influência, serão aplicadas ferramentas estatísticas em uma base de dados de manufatura aditiva, o que permite decidir as melhores condições de produção a fim de obter valores aceitáveis de resistência à tração da peça produzida.

## 1.3 DESCRIÇÕES DAS SEÇÕES

Para facilitar o entendimento do presente trabalho, foi feita sua divisão em cinco seções a seguir: introdução, revisão bibliográfica, materiais e métodos, resultados e discussões e conclusão.

Na seção 1, a introdução apresenta uma breve abordagem do tema, destacando a proposta de pesquisa e seus objetivos.

A seção 2 apresenta a fundamentação teórica incluindo os conceitos necessários para o desenvolvimento e entendimento do trabalho.

Subsequentemente, a seção 3 determina a metodologia para a elaboração e execução do trabalho, incluindo os materiais e processos necessários.

Já a seção 4 apresenta os resultados do procedimento elaborado, bem como da manufatura dos CPs e do ensaio de tração.

A seção 5 descreve as conclusões finais obtidas com o estudo, bem como sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas, que permitem localizar as literaturas estudadas, e os apêndices, que auxiliam na construção do trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção apresenta os conceitos teóricos necessários para o desenvolvimento do trabalho.

### 2.1 INDÚSTRIA 4.0

O termo Indústria 4.0 foi criado na Alemanha no ano de 2011 com o objetivo de simbolizar as fábricas inteligentes, que têm como característica principal a cooperação global e flexível nas indústrias que estavam começando a aparecer (SCHWAB, 2016). Chamada de quarta revolução industrial, ela é responsável por fundir a comunicação entre o mundo dos sistemas físicos e dos sistemas virtuais de fabricação em um ritmo muito acelerado, enquanto as três primeiras revoluções industriais demoraram décadas para serem implementadas ao redor do globo, a indústria 4.0 se difunde com velocidade impressionante (SCHWAB, 2016).

O foco da indústria 4.0 é a criação de produtos, procedimentos e processos inteligentes através de um fator essencial que deve estar presente: fábricas inteligentes que devem ser capazes de transformar a comunicação entre humanos, máquinas e recursos em algo natural (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013). A transformação de antigas fábricas para os novos moldes da indústria 4.0 passa por nove principais tecnologias, listadas na Figura 1, sendo que a conexão e integração de todos esses sistemas é essencial, possibilitando uma base de análise preditiva de falhas, ou seja, um sistema que se configura automaticamente e se adapta às mudanças (RÜSSMANN *et al.*, 2015).

**Figura 1 - Nove tecnologias que transformarão a produção industrial**



**Fonte: Tecnicon (2018)**

As nove tecnologias expostas na Figura 1 são fundamentais para a Indústria 4.0, pois quando utilizadas simultaneamente são capazes de criar fábricas inteligentes 100% integradas e automatizadas. *Big Data* e *Analytics* chamam atenção pela sua capacidade de suportar importantes tomadas de decisão, pois através da coleta e compreensão de dados do processo é capaz de diminuir custos, otimizar a produção, economizar energia e entregar um melhor produto com bom custo-benefício para o consumidor final (RÜSSMANN *et al.*, 2015).

A quarta revolução industrial está apenas começando e, no futuro, grandes mudanças lideradas pelas suas tecnologias são esperadas, entregando maior robustez e flexibilidade para os processos de engenharia, planejamento, manufatura, operações e logística; sempre incluindo os conceitos de fábricas e produtos inteligentes, com um alto nível de comunicação entre todas as etapas dos processos (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013).

## 2.2 MANUFATURA ADITIVA

Uma das tecnologias da Indústria 4.0, também chamada de impressão em 3D, é a Manufatura Aditiva (MA), definida pela criação de um objeto físico por adição sucessiva de material em camadas, de um modelo geométrico ou desenho digital

tridimensional, ou seja, é oposto ao processo de fabricação subtrativa com remoção de material (SCHWAB, 2016). O autor ainda acrescenta que essa tecnologia tem uma ampla gama de aplicações, sendo as principais encontradas nas indústrias automotivas, aeroespaciais e médicas.

Rodrigues *et al* (2017) adiciona que essa quantidade de aplicações decorre da evolução da MA e a sua capacidade de incluir diversos tipos de materiais e técnicas de produção, sendo importante conhecer qual o método ideal para cada material e aplicação. A Tabela 1, segundo Prakash, Nancharaih e Rao (2018), ilustra os materiais e métodos utilizados em MA:

**Tabela 1 - Materiais e métodos de impressão 3D**

<b>Tipo de Material</b>	<b>Processo de Manufatura Aditiva</b>
<b>Polímeros</b>	Estereolitografia
	Modelagem de Jato Múltiplo
	Sinterização Seletiva a Laser
	Modelagem por Deposição de Material Fundido
<b>Metais</b>	Fusão a Laser Seletiva
	Deposição de Metal a Laser
	Fusão por feixe de elétrons
<b>Cerâmicos</b>	Estereolitografia
	Modelagem por Deposição de Material Fundido
	Sinterização Seletiva a Laser
<b>Compósitos</b>	Modelagem por Deposição de Material Fundido
	Manufatura de Objetos em Lâminas
	Sinterização Seletiva a Laser
	Fusão a Laser Seletiva
	Laser Engineered Net Shaped

**Fonte: adaptado de Prakash, Nancharaih e Rao (2018)**

A MA tem papel fundamental na indústria 4.0 pela sua capacidade de não envolver economias de escala, ou seja, produzir com praticamente o mesmo custo unitário uma peça em grande escala ou uma única unidade. Isso confere uma excelente agilidade ao processo, por exemplo, de prototipagem (RODRIGUES *et al.*, 2017).

Segundo Prakash, Nancharaih e Rao (2018), algumas vantagens e desvantagens do processo de fabricação por MA podem ser descritas como:

## Vantagens

- Rápida prototipagem de modelos em CAD;
- Desperdício mínimo de material;
- Não necessidade de recursos auxiliares como ferramentas de corte;
- Complexidade geométrica elevada das peças produzidas;
- Flexibilidade de produção, sem depender da habilidade de operadores;

## Desvantagens

- Limitação de tamanho das peças;
- Imperfeições no acabamento;
- Alto custo de investimento.

Além disso, Volpato (2017) acrescenta como limitação da tecnologia o fato de que as propriedades de um material obtido por MA não serem as mesmas dos materiais manufaturados por métodos tradicionais, por causa da anisotropia decorrente da adição sucessiva de camadas. Sampaio (2017) afirma que os principais problemas dessa característica ocorrem ao aplicar esforços de tração nas peças, que podem se mostrar frágeis.

O método da impressão adotado, o material de fabricação da peça e a definição dos parâmetros de impressão também podem influenciar nas propriedades dos materiais produzidos por MA, sendo assim apresentados nas seções seguintes.

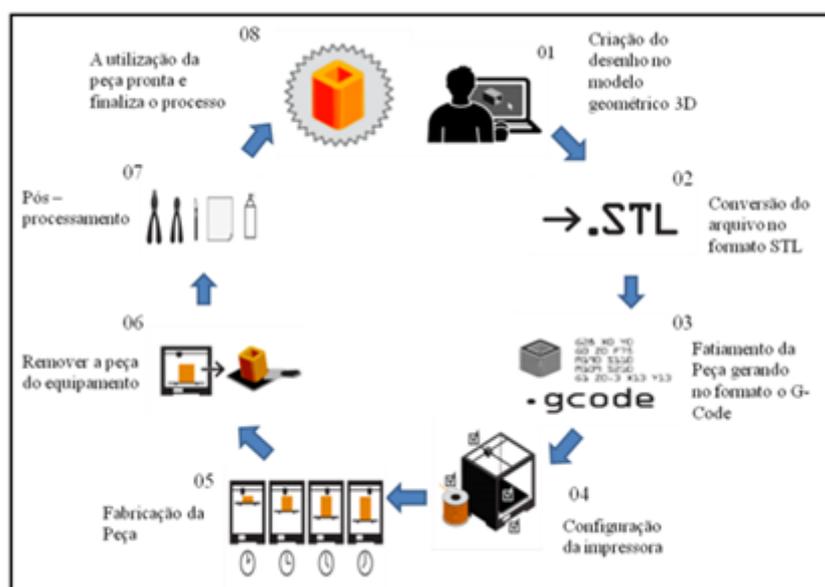
### 2.3 MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO

Segundo Silva (2020), existem diversos processos de MA, sendo alguns deles: jateamento de aglomerante, deposição direta por aplicação de energia, extrusão de material, jateamento de material, fusão seletiva de material em pó, laminação de chapas e fotopolimerização de líquido. Para o presente trabalho, o processo mais relevante a ser estudado é a MA por extrusão de material, também chamada de modelagem por fusão e deposição (*fused deposition modeling* - FDM).

Em geral, o processo de MA necessita de oito etapas segundo Gibson *et al.* (2009 apud RODRIGUES *et al.*, 2017), conforme Figura 2:

1. Aplicação de um software CAD (*Computer-aided design*) para definir a geometria da peça a ser produzida;
2. Conversão para o formato STL (*Surface Tessellation Language*), padrão utilizado pela indústria;
3. Transferência para o equipamento de manufatura e manipulação do arquivo para eventuais correções;
4. Configuração da máquina conforme a definição dos parâmetros de produção;
5. Produção da peça;
6. Remoção da peça após sua produção;
7. Pós processamento, eventualmente necessário para garantir a qualidade estética da peça impressa.
8. Aplicação da peça produzida.

**Figura 2 - Etapas do processo de fabricação por MA**

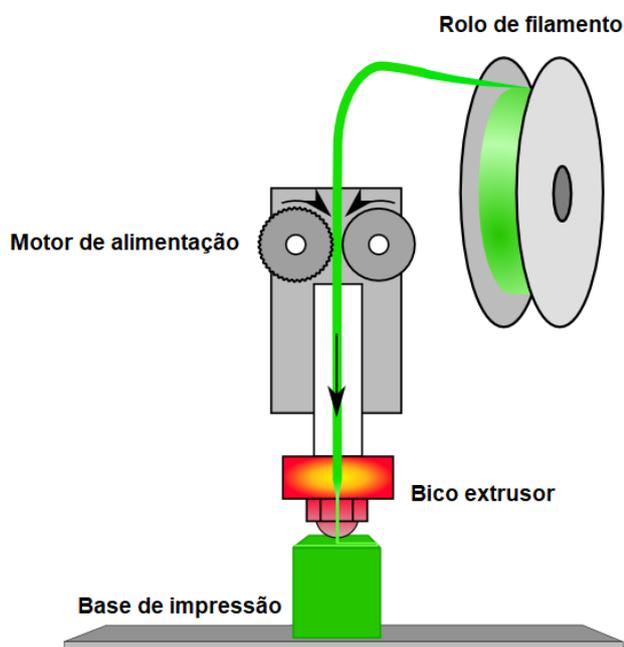


Fonte: Santos *et al.* (2018)

Na FDM, a fabricação da peça se dá pela deposição de material na forma de um filamento de diâmetro reduzido, obtido pela extrusão em um bico calibrado (VOLPATO, 2017). Em teoria, qualquer material que possa ser levado ao estado pastoso e depois endurecido pode ser utilizado na técnica, o que justifica ela ser utilizada amplamente com materiais termoplásticos.

A Figura 3 apresenta um modelo esquemático da impressora 3D que utiliza FDM. O rolo representado contém o filamento de matéria prima que será conduzido até o motor de alimentação, que controla precisamente o avanço do material ao bico extrusor, no qual o filamento é aquecido até a temperatura de fusão. Por fim, o material fundido é depositado na base de impressão, também chamada de mesa, onde se solidifica (REPRAP, 2016).

**Figura 3 - Modelagem por fusão e deposição**



**Fonte: adaptado de RepRap (2016)**

Para se obter a geometria desejada conforme a deposição do material, o cabeçote extrusor se movimenta em um plano cartesiano horizontal, representando os eixos X e Y, e deposita o material fundido, que passou pelo processo de extrusão, em uma plataforma aquecida que se desloca para baixo, representando o eixo Z (SANTOS; *et al.*, 2018).

Segundo Santos *et al.* (2018), o processo de FDM apresenta vantagens como a facilidade da troca da matéria prima a ser utilizada na impressora, bem como a redução de desperdício de material e a facilidade da remoção da peça impressa, além de ser fabricada com baixo custo. Não obstante, desvantagens como lentidão de fabricação, necessidade de suportes e velocidade de impressão restrita pela taxa de extrusão também estão presentes na tecnologia.

## 2.4 MATERIAIS DE IMPRESSÃO

Segundo Santos *et al.* (2018), a FDM utiliza como matéria prima materiais polímeros termoplásticos que podem ser facilmente modelados com a aplicação de calor, sendo possível ser moldados diversas vezes. Os principais materiais utilizados na tecnologia incluem Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), Poli Ácido Lático (PLA), nylon, Poli Tereftalato de Etileno (PET), Polietileno de Alta Densidade (PEAD), Polipropileno (PP), Poliestireno (PS) e Policarbonato (PC).

Neste trabalho, os materiais analisados serão o ABS e o PLA, que serão melhor descritos nas subseções seguintes.

### 2.4.1 Acrilonitrila Butadieno Estireno

O ABS é um polímero composto de petróleo formado por três diferentes monômeros: o Acrilonitrila, que apresenta boa durabilidade e resistência química e térmica; o Butadieno, que oferece uma boa resistência ao impacto; e o Estireno, que apresenta resistência mecânica, facilidade de processamento e brilho (SANTOS *et al.*, 2018).

Sampaio (2017) acrescenta a grande solubilidade do ABS em acetona. Essa propriedade é amplamente utilizada para acabamento, pois permite tratar uma superfície de uma peça impressa com pinceladas ou vapor de acetona, deixando-a lisa e brilhante. A Figura 4 apresenta o efeito que um banho de vapor de acetona causa em uma peça de ABS fabricada por FDM.

**Figura 4 - Efeito banho de vapor de acetona em uma peça de ABS**



Fonte: Sampaio (2016)

Embora historicamente seu uso esteja diminuindo devido a disponibilidade de outros materiais, o ABS é o primeiro material a ser utilizado para impressão 3D e continua sendo amplamente aplicado, devido suas boas propriedades mecânicas e preço (SAMPAIO, 2017). Santos *et al.* (2018) acrescenta que esse polímero é aplicado em diversas áreas da indústria, como eletrodomésticos, peças automotivas e brinquedos.

#### 2.4.2 Poli Ácido Lático

O PLA foi o primeiro polímero alternativo ao ABS para o processo de FDM, sendo que ambos têm a mesma faixa de preço e são interpretados como contrapontos, pois seus pontos fortes e fracos são praticamente inversos. Assim, juntos, o PLA e o ABS representam, respectivamente, as duas principais categorias de materiais para FDM, os de baixa e alta temperatura de trabalho (SAMPAIO, 2017).

Sampaio (2017) descreve que o PLA tem menor resistência à compressão, menor resistência ao calor e é mais quebradiço que o ABS. Todavia, apresenta melhor aderência entre camada, melhor resistência à tração, é mais rígido e tem maior resistência química que o ABS.

Além disso, o PLA é considerado renovável por ser biodegradável e obtido por meio da extração do milho, trigo ou cana-de-açúcar. Assim, ele é extremamente vantajoso no sentido de impacto ambiental, sendo que seu tempo de decomposição é em média de 6 a 24 meses (SANTOS *et al.*, 2018). Por essas vantagens, o material é amplamente aplicado, por exemplo, em embalagens alimentícias, cosméticas, canetas, tampas, copos e dispositivos médicos.

## 2.5 PARÂMETROS DE IMPRESSÃO

Silva *et al.* (2020) afirma que os principais parâmetros de impressão são: altura da camada, espessura da parede, retração, densidade de preenchimento, velocidade de impressão, suporte e tipo de adesão à plataforma, sendo todas elas variáveis ajustáveis que alteram o resultado da peça fabricada.

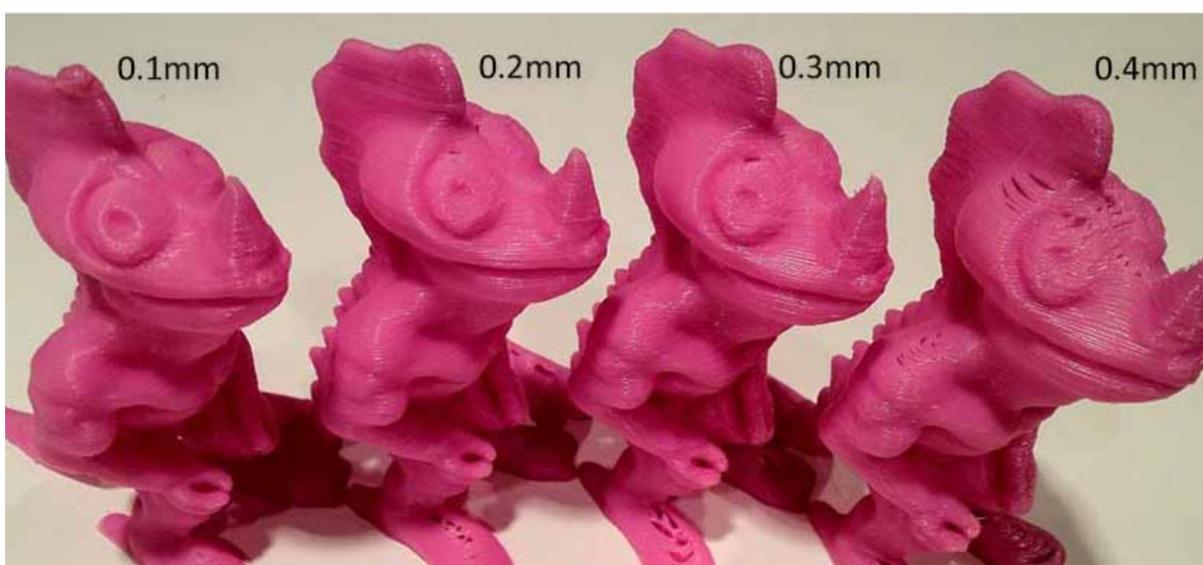
Além disso, a maioria dos parâmetros de fabricação por FDM são semelhantes aos das tecnologias baseadas em extrusão de material (VOLPATO, 2017). No presente trabalho, serão avaliados os seguintes parâmetros: altura de

camada, espessura de parede, densidade de preenchimento, padrão de preenchimento, temperatura do bico, temperatura da mesa e velocidade de impressão.

### 2.5.1 Altura de Camada

A altura de camada é, como o nome sugere, a altura exata de cada camada de material depositado, curado ou sinterizado por fabricação 3D. Esse parâmetro geralmente é medido em micrômetros, sendo os valores padrões variando entre 50 e 100 micrômetros. Assim, como apresentado na Figura 5, quanto menor a altura de camada, melhor a resolução e acabamento da peça, porém maior é o tempo de impressão (GRAMES, 2021).

**Figura 5 - Efeito do aumento da altura de camada**



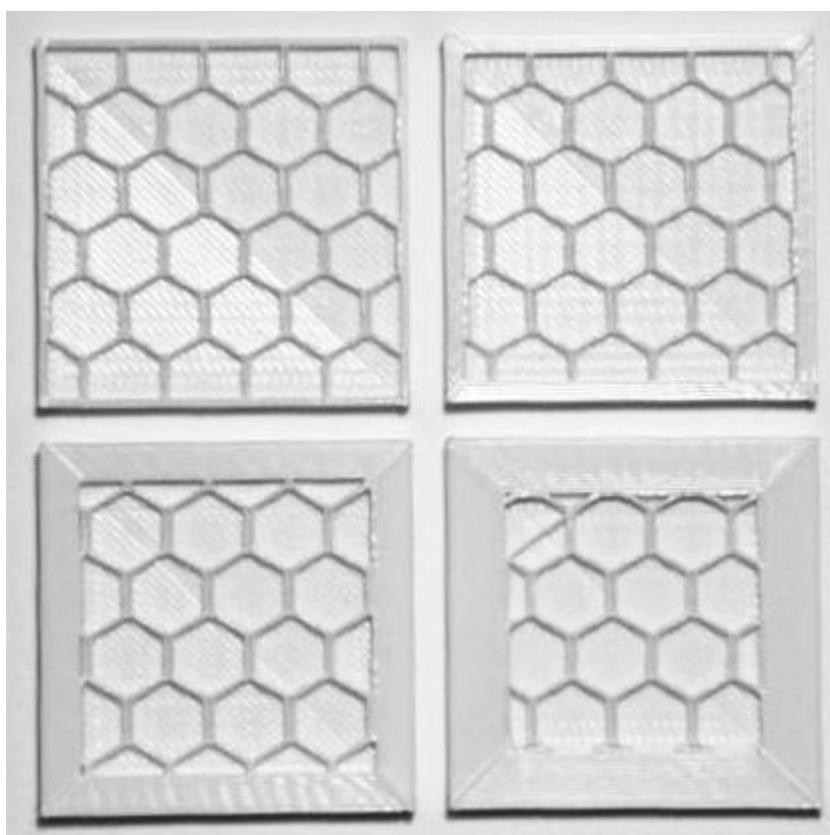
**Fonte: Faouakhiri (2015)**

Silva *et al.* (2020) acrescenta que impressões com baixa resolução são boas para prototipagem rápida, uma vez que detalhes superficiais podem não ser necessários.

### 2.5.2 Espessura de Parede

Segundo Silva *et al.* (2020), a espessura de parede está relacionada com o número de vezes que as linhas externas da peça impressa serão traçadas antes da impressora começar o interior, ou parte vazia. Isso define a espessura das partes laterais e é um dos principais parâmetros de impressão que contribuem para a resistência, sendo que, quanto maior a espessura de parede, maior a resistência da peça.

**Figura 6 - Espessura de parede**



**Fonte: Flashforge (2016)**

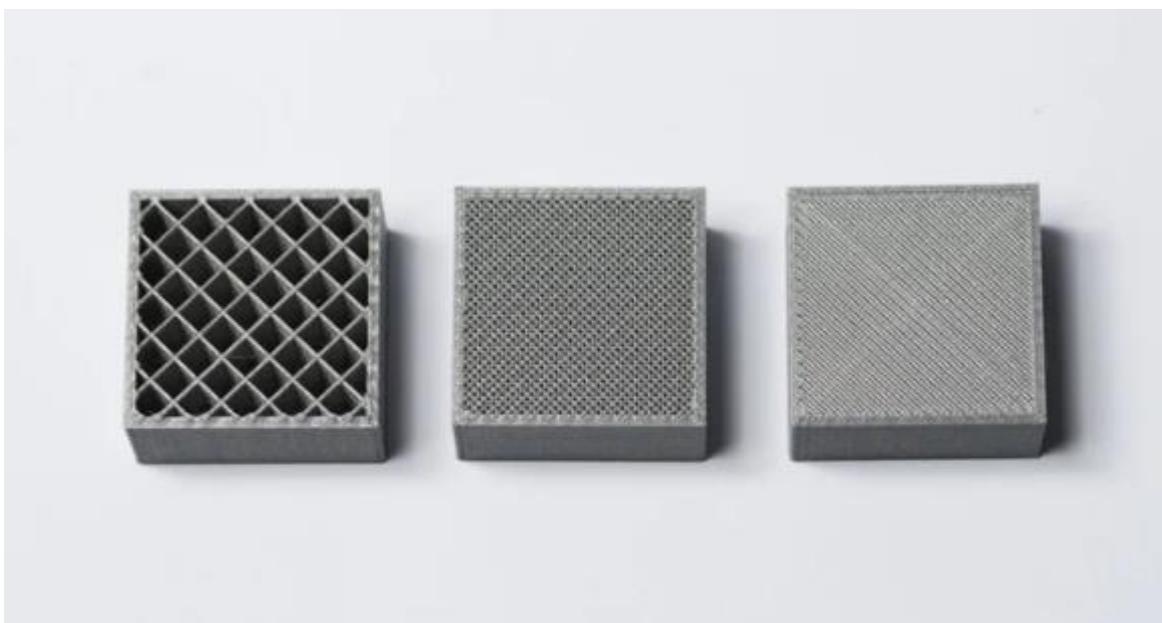
A Figura 6 ilustra uma mesma geometria impressa com diferentes espessuras de parede, sendo esse parâmetro medido geralmente em perímetros ou milímetros, podendo influenciar também na dureza da peça (FLASHFORGE, 2016).

### 2.5.3 Densidade de Preenchimento

A densidade de preenchimento está relacionada com a quantidade percentual de espaço vazio dentro das paredes do objeto impresso, sendo que se uma peça tem 100% de preenchimento, ela será completamente sólida por dentro (SILVA *et al.*, 2020).

A Figura 7 apresenta o mesmo modelo de peça, alterando-se apenas a densidade de preenchimento, sendo menor à esquerda e maior à direita.

**Figura 7 - Densidade de preenchimento**



Fonte: O'Connell (2021)

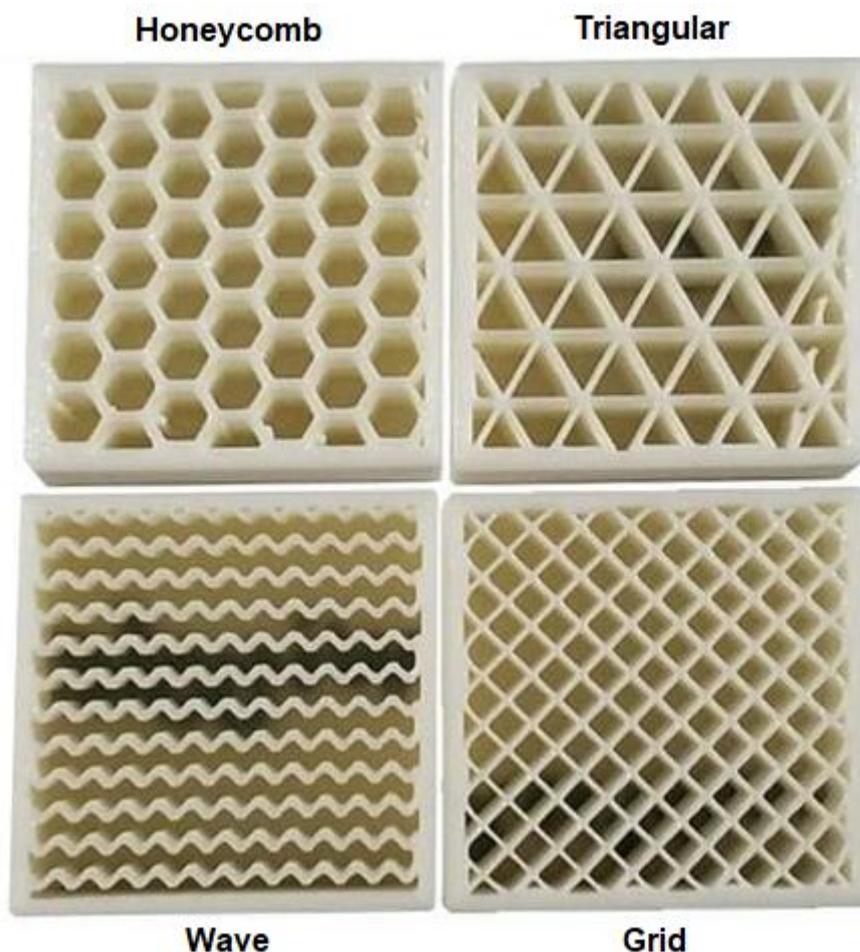
Silva *et al.* (2020) acrescenta que quanto maior for a porcentagem de preenchimento, mais resistente e pesada será a peça impressa, todavia, maior também será o tempo de impressão e a quantidade de material utilizada.

### 2.5.4 Padrão de Preenchimento

O padrão de preenchimento é o parâmetro que define a estrutura interna da peça impressa. Existem diversos tipos de padrões, sendo que eles influenciam na resistência e tempo de impressão da peça (O'CONNELL, 2021).

A Figura 8 a seguir ilustra os padrões mais comuns de preenchimento.

Figura 8 - Principais padrões de preenchimento



Fonte: adaptado de Impresoras3D [2018?]

O formato *honeycomb* é o modelo mais resistente, sendo que apresenta boa resistência em todas as direções e acrescenta pouco no tempo de impressão. O formato triangular é indicado quando é necessária resistência a esforços na direção da parede, porém aumenta o tempo de impressão. O formato *wave*, ou onda, é indicado para peças que sofrem esforço de compressão e em peças flexíveis. Por fim, o formato de *grid*, ou retangular, é um dos mais comuns utilizados e, além disso, apresenta boa resistência em todos os sentidos e é de fácil impressão (3DLAB, [2019?]).

#### 2.5.5 Temperatura de Bico e Mesa e Velocidade de Impressão

A temperatura do bico extrusor muda para cada material impresso devido às variações das temperaturas de fusão do material. Esse fator afeta diretamente a

qualidade da impressão 3D e, caso abaixo do recomendado, pode gerar problemas como baixa aderência entre camadas, empenamento e não extrusão do material. Todavia, se acima do recomendado, pode gerar aparecimento de fios ou derretimento, aquecimento excessivo e entupimento do bico extrusor (SILVA *et al.*, 2020).

A temperatura da mesa é outro parâmetro regulável, sendo que, geralmente, uma mesa mais quente garante uma melhor adesão do material depositado e uma menos quente resulta em empenamento da peça impressa. Não obstante, deformações podem ocorrer na mesa caso ela seja excessivamente aquecida (O'CONNELL, 2021).

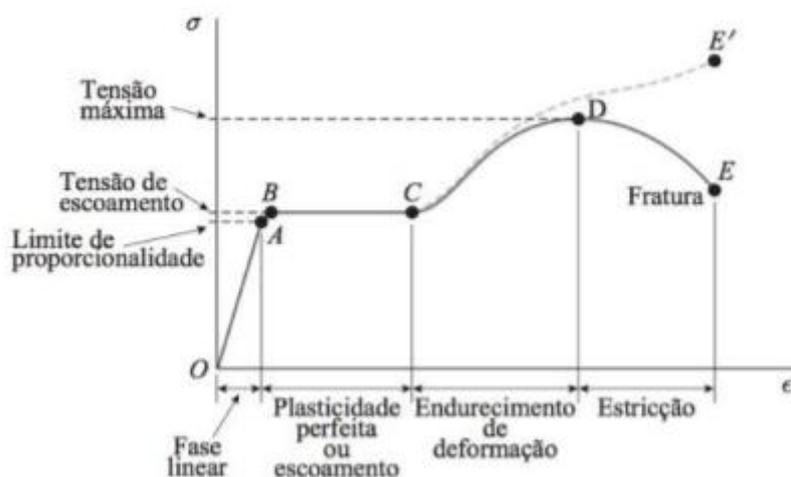
O'Connell (2021) acrescenta que a velocidade de impressão indica o quão rápido o bico extrusor se movimenta no plano XY. Em geral, grandes velocidades de impressão podem gerar problemas como falhas de impressão e perda na qualidade superficial, sendo recomendado utilizar os padrões usuais das impressoras, cerca de 150mm/s.

## 2.6 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

O ensaio de resistência à tração é considerado como um dos mais importantes ensaios mecânicos existentes, isso por conta da sua facilidade de execução e possibilidade de determinação de diversas propriedades do material. Dentre essas propriedades mecânicas destacam-se: o limite de resistência à tração, propriedades elásticas, tenacidade, limite de escoamento e ductilidade (ASKELAND; WRIGHT, 2015).

O resultado do ensaio de tração é o diagrama tensão deformação, representado na Figura 9, no qual tem-se os valores da tensão máxima suportada pelo material e a tensão de escoamento no eixo vertical, enquanto no eixo horizontal nota-se a representação das deformações. A deformação na fase linear é regida pela Lei de Hooke e ocorre linearmente conforme a aplicação da tensão. Na fase plasticidade perfeita ou escoamento, a deformação crescerá rapidamente e a peça não retornará as dimensões iniciais após cessado o esforço. Na próxima fase, o material endurece, causando o aumento da tensão necessária para a continuidade da deformação, até atingir a tensão máxima também chamada de tensão última. Após isso, há uma estrição da peça avaliada até a sua fratura (GERE; GOODNO, 2010).

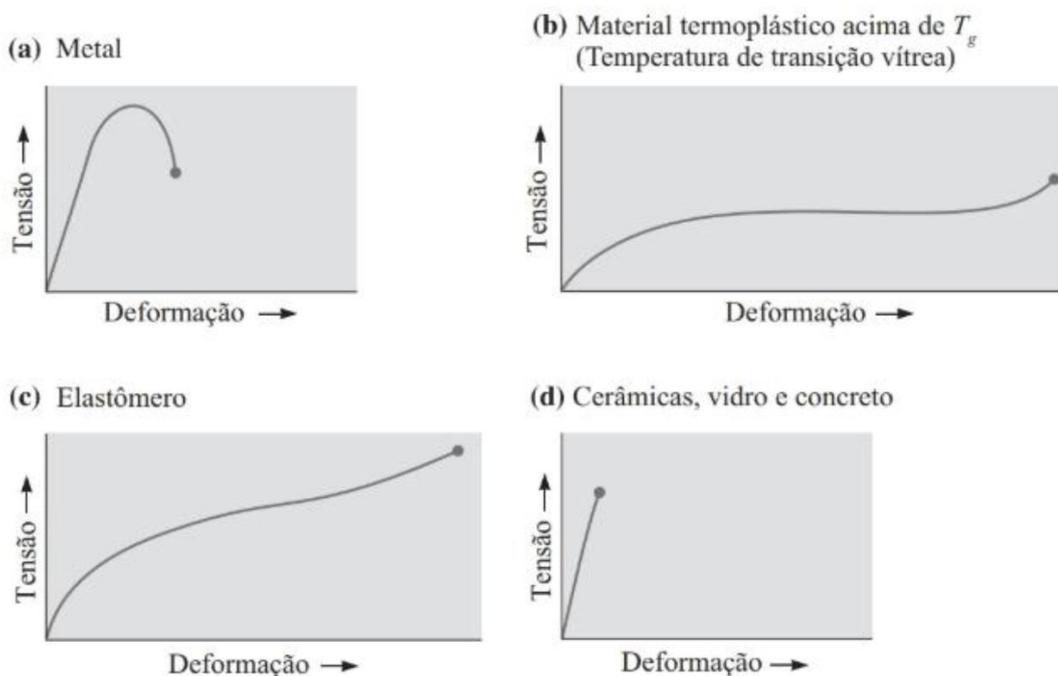
Figura 9 - Diagrama tensão-deformação de um aço típico de estruturas



Fonte: Gere e Goodno (2010)

O diagrama apresentado na Figura 9 é comum para aços, todavia, de acordo com Askeland e Wright (2015), se o material for alterado diferentes resultados para a curva tensão-deformação serão encontrados, como é possível notar na Figura 10.

Figura 10 - Curvas tensão-deformação em diferentes materiais



Fonte: Askeland e Wright (2015)

A Figura 10 apresenta o gráfico de tensão-deformação característico para diversos materiais, sendo que o comportamento dos termoplásticos tipicamente pode ser representado pela Figura 10 (b).

É importante notar que para a realização do ensaio de resistência à tração é necessária a utilização de uma norma, como a ASTM D 638-02a, incluindo a especificação dos corpos de prova independentemente do material a ser utilizado.

## 2.7 BIG DATA

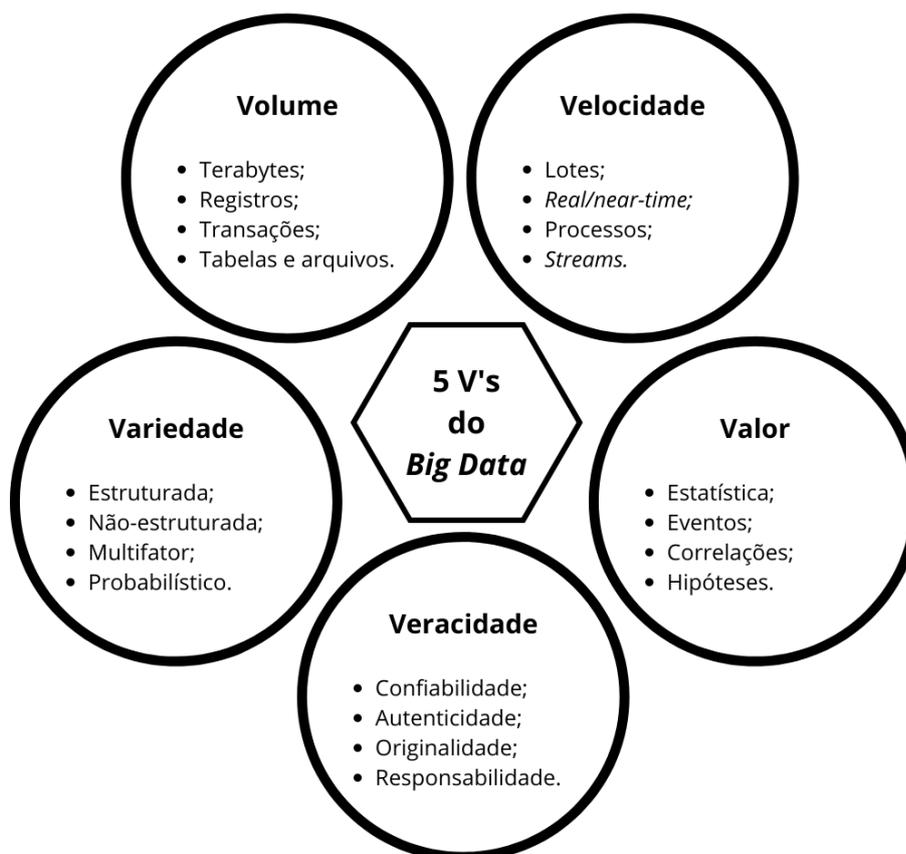
Atualmente, o poder de armazenamento assim como os recursos computacionais e a conexão com a internet amplamente utilizados pela população mundial nos permite concluir que estamos na era dos dados (MARQUESONE, 2016). A quantidade de dados produzidos no mundo aumenta a cada segundo e, conforme Schwab (2016), a mudança associada à coleta e análise desses dados permitirá melhorar a tomada de decisão para empresas e governos de forma a encontrar melhores formas de servir seus cidadãos ou clientes.

Segundo Taurion (2013), o grande volume de dados gerados juntamente com sua interpretação têm o potencial para transformar economias, redesenhando a área de TI (Tecnologia da Informação) de uma função operacional para estratégica ao definir a direção dos investimentos dentro dos negócios. Os dados são provenientes das mais diversas fontes, como IoT (*Internet of Things*), redes sociais, *smartphones*, sensores e muito mais, sendo que, segundo Schwab (2016), o volume de dados gerados em todo o mundo, incluindo todas as empresas, dobra a cada 1,2 anos.

O conceito de *Big Data* não é somente o volume, mas a variedade dentro e fora das empresas e como esses dados são interpretados (TAURION, 2016). O autor acrescenta que *Big Data* não pode ser definido somente como *software* ou *hardware*, mas como uma união das tecnologias e processos adequados com a finalidade de analisar dados que anteriormente não eram disponíveis, permitindo gerenciar atividades e tomar decisões de forma mais assertiva e acelerada.

Assim sendo, podemos atribuir algumas características à *Big Data*, chamadas de 5Vs, demonstradas na Figura 11.

Figura 11 - 5 Vs do Big Data



Fonte: adaptado de Ishwarappa e Anuradha (2015)

Segundo Ishwarappa e Anuradha (2015), os 5Vs são descritos como:

- **Volume:** característica dominante que impulsionou a criação do conceito de *Big Data*. O volume é o que limita as tecnologias tradicionais no processamento da grande quantidade de dados.
- **Velocidade:** se refere ao ritmo em que os dados são criados, processados, armazenados e analisados.
- **Variedade:** os dados têm inúmeras fontes e, por isso, nem sempre vêm estruturados e com fácil interpretação. Isso significa que, em sua essência, *Big Data* requer uma maior complexidade tanto em armazenamento quanto em análise dos dados coletados.
- **Veracidade:** com grande volume, velocidade e variedade, nem sempre se pode garantir que os dados correspondem à realidade. Assim, a acurácia das decisões tomadas com base em *Big Data* depende da veracidade da fonte de dados.

- Valor: é a característica mais importante de *Big Data*. Pelo potencial grande, as análises devem ser pensadas em gerar valor, caso contrário serão inúteis. Isso justifica o capital de tempo e infraestrutura investido para realizar as análises em *Big Data*.

## 2.8 DATA ANALYTICS

Uma vez que se tem a infraestrutura necessária para suportar a coleta, armazenamento e processamento dos dados, deve-se dar atenção para *Data Analytics*, já que ela é a etapa na qual se transformam os dados em algo de valor (TAURION, 2013).

Uma vez necessário, o conceito de *Data Analytics* é a utilização extensiva dos dados, incluindo análises estatísticas, quantitativas, modelos explicativos, preditivos e gerenciamento baseado em fatos para orientar decisões e ações (FERREIRA; GOMES, 2019). Os autores ainda adicionam que se pode afirmar que *Data Analytics* é uma etapa que abrange inúmeras atividades em vários estágios do gerenciamento de dados e pode ser categorizada de três formas:

- Análise descritiva: refere-se ao conhecimento do que acontece na organização, buscando entender as tendências e causas dessa ocorrência;
- Análise preditiva: busca determinar o que acontecerá no futuro utilizando técnicas de modelagem para prever resultados com base nos dados atuais;
- Análise prescritiva: examina as tendências atuais e indica uma ação para atingir um objetivo específico, podendo ser contra ou a favor de uma prévia análise preditiva.

Segundo Ghasemaghaei (2019), ter competência em recursos de *Data Analytics* tem um papel central em melhorar a qualidade de decisão de uma empresa quando há compartilhamento de conhecimento. O autor ainda acrescenta que, se o conhecimento não é compartilhado, a capacidade de *Data Analytics* não gera melhoria na tomada de decisão. Não obstante, caso os modelos de análise sejam rudimentares

e houver compartilhamento do conhecimento gerado através deles, a qualidade da tomada de decisão pode ser significativa e negativamente impactada.

Assim, *Data Analytics* é uma ferramenta que auxilia no processo de tomada de decisão e, por isso, tem uma crescente utilização principalmente dentro de grandes empresas (WATSON, 2019).

## 2.9 TRANSFORMAÇÃO DE DADOS

No contexto de *Data Analytics*, no qual as fontes e escalas de dados são muito variáveis, técnicas para transformá-los são muito utilizadas. Isso pode ser feito, por exemplo, com padronização ou normalização, tendo como objetivo alterar os valores numéricos de bancos de dados para uma escala comum sem distorcer as diferenças entre os valores (KAPPAL, 2019).

Vaz (2019) acrescenta uma diferenciação entre padronização e normalização de dados. Primeiramente o autor comenta que ambas as técnicas têm o mesmo objetivo: transformar todas as variáveis na mesma ordem de grandeza. Todavia, a padronização resulta em uma média igual a 0 e um desvio padrão igual a 1 enquanto a normalização distribui linearmente as variáveis dentro do intervalo de 0 e 1.

Para normalização, geralmente é utilizado a normalização Mín-Máx e, para padronização, é utilizada a fórmula *z-score* (VAZ, 2019). Além de adequar os dados em uma mesma escala, o método Mín-Máx também é utilizado para preservar a privacidade durante o processo de mineração de dados (SARANYA; MANIKANDAN, 2013).

A Equação 1 apresenta a fórmula *z-score*:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

Na qual:

- $x$  é o valor a ser transformado;
- $\mu$  é a média do conjunto de dados;
- $\sigma$  é o desvio padrão do conjunto de dados;
- $z$  é o valor transformado.

A Equação 2 apresenta a fórmula da Normalização Mín-Máx:

$$z = \frac{x - \min(x)}{[\max(x) - \min(x)]} \quad (2)$$

Na qual:

- $x$  é o valor a ser transformado;
- $\min(x)$  é o menor valor do conjunto de dados;
- $\max(x)$  é o maior valor no conjunto de dados;
- $z$  é o valor do dado transformado, variando entre 0 e 1.

A utilização da normalização Mín-Máx é indicada se a distribuição não é Gaussiana ou se o desvio padrão é muito pequeno (VAZ, 2019). Não obstante, apesar de ser a transformação mais utilizada, ela tem a desvantagem de dificultar a identificação de *outliers* no banco de dados (KAPPAL, 2019).

Assim, para identificar qual a transformação mais adequada para o banco de dados analisado e evitar esse tipo de problema, Vaz (2019) sugere testar diferentes modelos e avaliar o resultado.

## 2.10 ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA

Nos dias atuais a tomada de decisão baseada em dados se tornou extremamente importante e a sua escala tende a continuar subindo. Antigamente, dados e informações do que estava acontecendo eram restritos, hoje, é possível coletar em grandes bancos de dados toda a informação necessária de qualquer processo, a única variante faltante é a transformação desses dados em conhecimento e é para isso que serve a análise multivariada. Em termos técnicos, a análise multivariada é qualquer análise que considera simultaneamente mais do que duas variáveis em seu processo, tendo como objetivo final medir, explicar e prever a correlação entre as variáveis analisadas (HAIR JR. *et al.*, 2009).

### 2.10.1 Conceitos Básicos da Análise Multivariada

Alguns conceitos básicos devem ser considerados para entender a análise multivariada. O primeiro deles é a variável estatística que, de acordo com Hair Jr. *et al.* (2009), é uma combinação linear de variáveis com pesos empiricamente determinados, como mostra a Equação 3.

$$\text{Valor da variável estatística} = w_1X_1 + w_2X_2 + w_3X_3 + \dots + w_nX_n \quad (3)$$

Na qual:

- $X_1$  até  $X_n$  são as variáveis independentes;
- $w_1$  à  $w_n$  são os pesos específicos das variáveis independentes.

Outro conceito importante são as escalas de medida. Escolher uma escala de medida para cada variável é fundamental, pois os dados não significam nada se não forem mensurados da maneira correta. Existem duas categorias principais na qual os dados podem ser classificados: não-métricos (qualitativos) ou métricos (quantitativos), cada variável a ser analisada deve ser classificada em um desses grupos de acordo com as suas características (HAIR JR. *et al.*, 2009).

As escalas de medida não-métrica indicam a presença ou a ausência de uma determinada característica ou propriedade, sendo sempre excludentes (apenas uma característica pode ser selecionada) e não demonstram nenhum valor quantitativo, podendo ser divididas em escalas nominais ou escalas ordinais. As escalas de medida métrica são necessariamente quantitativas e mostram a quantidade ou magnitude da variável analisada, sendo divididas em dois grupos: escalas intervalares ou escalas de razão (HAIR JR. *et al.*, 2009).

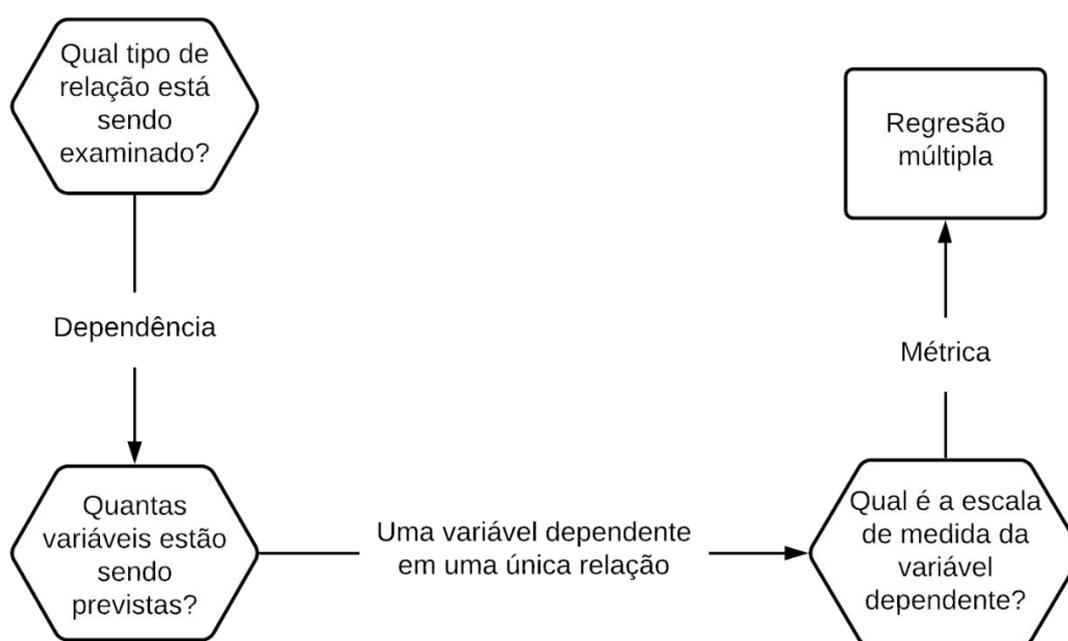
### 2.10.2 Definição da Análise Estatística Multivariada Adequada

As técnicas de análise multivariada são classificadas em dois diferentes grupos: técnica de dependência ou interdependência. Nas técnicas de dependência uma variável pode ser definida como dependente a ser explicada e prevista por outras variáveis independentes do banco de dados; na técnica de interdependência nenhuma

das variáveis pode ser definida como dependente ou independente, ou seja, o processo necessita de uma análise simultânea de todas as variáveis do sistema (HAIR JR. *et al.*, 2009).

Além desses dois conceitos, de acordo com Hair Jr. *et al.* (2009), três perguntas devem ser feitas para auxiliar na definição da técnica de análise escolhida, como é demonstrado na Figura 12.

**Figura 12 - Seleção de uma técnica de análise multivariada**



**Fonte: adaptado de Hair Jr. *et al.* (2009)**

A Figura 12 descreve os critérios para a utilização da regressão múltipla, sendo que a variável analisada deve ser única, métrica e dependente em relação às outras variáveis, que são independentes.

Após identificar as respostas das perguntas é possível seguir um caminho pré-determinado e escolher qual técnica de análise multivariada utilizar. Para este trabalho a análise estatística que possui relevância é a regressão linear múltipla, pois de acordo com os dados que serão utilizados essa é a análise que cumpre todos os critérios necessários.

## 2.11 REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

A regressão múltipla é utilizada para analisar como uma variável dependente se comporta de acordo com as mudanças de diversas variáveis independentes, sendo que o objetivo da análise é realizar uma previsão do valor da variável dependente. As variáveis independentes podem ter pesos relativos que melhor se encaixam no modelo e, de acordo com Hair Jr. *et al.* (2009), duas regras devem ser seguidas para ser possível a aplicação da regressão linear múltipla: (1) os dados devem ser métricos ou adequadamente transformados e (2) as variáveis independentes e dependente devem ser definidas antes de se estabelecer a equação.

De acordo com Da Cunha e Carlos (2007), o modelo estatístico de uma regressão linear múltipla com  $k$  variáveis segue a Equação 4:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_k X_{ik} + \epsilon_1 \quad (4)$$

Na qual:

- $Y_i$  é o valor da variável dependente no  $i$ -ésimo nível de  $X$ ;
- $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$  são os parâmetros desconhecidos que serão estimados;
- $X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ik}$  são as variáveis independentes ( $i = 1, 2, \dots, n$ );
- $\epsilon_1$  é o erro relacionado à diferença de valores entre  $Y_i$  e o valor estimado.

Para obter a equação estimada, é recomendada a utilização do método dos mínimos quadrados, que é um procedimento usado para estimar os coeficientes da regressão, minimizando a soma total dos quadrados dos resíduos (DA CUNHA; CARLOS, 2007). Sabendo disso e, por motivos didáticos, considerando que temos uma regressão linear com apenas duas variáveis, a aplicação do método dos mínimos quadrados irá obter a Equação 5:

$$\sum_{i=1}^n e_1^2 = \sum_{i=1}^n [Y_i - \beta_0 - \beta_1 X_{i1} - \beta_2 X_{i2}]^2 \quad (5)$$

Portanto, os estimadores  $\beta_0, \beta_1$  e  $\beta_2$  que minimizarão os erros do sistema serão obtidos pelas Equações 6, 7 e 8:

$$\Sigma y = \widehat{\beta}_0 + \widehat{\beta}_1(\Sigma x_1) + \widehat{\beta}_2(\Sigma x_2) \quad (6)$$

$$\Sigma x_1 y = \widehat{\beta}_0(\Sigma x_1) + \widehat{\beta}_1(\Sigma x_1^2) + \widehat{\beta}_2(\Sigma x_1 x_2) \quad (7)$$

$$\Sigma x_2 y = \widehat{\beta}_0(\Sigma x_2) + \widehat{\beta}_1(\Sigma x_1 x_2) + \widehat{\beta}_2(\Sigma x_2^2) \quad (8)$$

Resolvendo o sistema das Equações 6, 7 e 8, tem-se as Equações 9, 10 e 11:

$$\widehat{\beta}_2 = \frac{\left(\Sigma x_1^2 - \frac{(\Sigma x_1)^2}{n}\right)\left(\Sigma x_2 y - \frac{\Sigma x_2 \Sigma y}{n}\right)\left(\Sigma x_1 x_2 - \frac{\Sigma x_1 \Sigma x_2}{n}\right)\left(\Sigma x_1 y - \frac{\Sigma x_1 \Sigma y}{n}\right)}{\left(\Sigma x_1^2 - \frac{(\Sigma x_1)^2}{n}\right)\left(\Sigma x_2^2 - \frac{(\Sigma x_2)^2}{n}\right)\left(\Sigma x_1 x_2 - \frac{\Sigma x_1 \Sigma x_2}{n}\right)^2} \quad (9)$$

$$\widehat{\beta}_1 = \frac{\left(\Sigma x_1 y - \frac{\Sigma x_1 \Sigma y}{n}\right) - \widehat{\beta}_2\left(\Sigma x_1 x_2 - \frac{\Sigma x_1 \Sigma x_2}{n}\right)}{\Sigma x_1^2 - \frac{(\Sigma x_1)^2}{n}} \quad (10)$$

$$\widehat{\beta}_0 = \bar{Y} - \widehat{\beta}_1 \bar{X}_1 - \widehat{\beta}_2 \bar{X}_2 \quad (11)$$

E o modelo de regressão linear múltipla ajustado será a Equação 12:

$$\hat{Y} = \widehat{\beta}_0 + \widehat{\beta}_1 X_1 + \widehat{\beta}_2 X_2 \quad (12)$$

A partir disso, a análise de variância é necessária para encontrar qual é a significância da regressão e saber se o modelo encontrado possui uma boa qualidade (DA CUNHA; CARLOS, 2007). De acordo com Hair Jr. *et al.* (2009), a análise que possui como resultado final a significância geral do modelo estatístico é de extrema importância, pois é por meio dela que é possível obter as informações necessárias para tomar a decisão de continuar a interpretação da análise do modelo, se é preciso proceder com uma mudança, ou reespecificação do método estatístico utilizado. Então, tem-se as Equações 13, 14 e 15:

$$SQ_{Total} = \Sigma y^2 - \frac{(\Sigma y)^2}{n} \quad (13)$$

$$SQ_{Reg} = \widehat{\beta}_1 \left( \sum x_1 y - \frac{\sum x_1 \sum y}{n} \right) + \widehat{\beta}_2 \left( \sum x_2 y - \frac{\sum x_2 \sum y}{n} \right) \quad (14)$$

$$SQ_{Res} = SQ_{Total} - SQ_{Reg} \quad (15)$$

Na qual:

- $SQ_{Total}$  é a soma dos quadrados totais;
- $SQ_{Reg}$  é a soma dos quadrados da regressão;
- $SQ_{Res}$  é a soma dos quadrados dos resíduos.

Com esses valores é possível calcular o coeficiente de determinação  $R^2$ . Que, de acordo com Henriques (2011), nos dá uma proporção da variação total do modelo encontrado. Portanto, tem-se a Equação 16:

$$R^2 = \frac{SQ_{Reg}}{SQ_{Total}} = 1 - \frac{SQ_{Res}}{SQ_{Total}} \quad (16)$$

Henriques (2011) ainda acrescenta que:

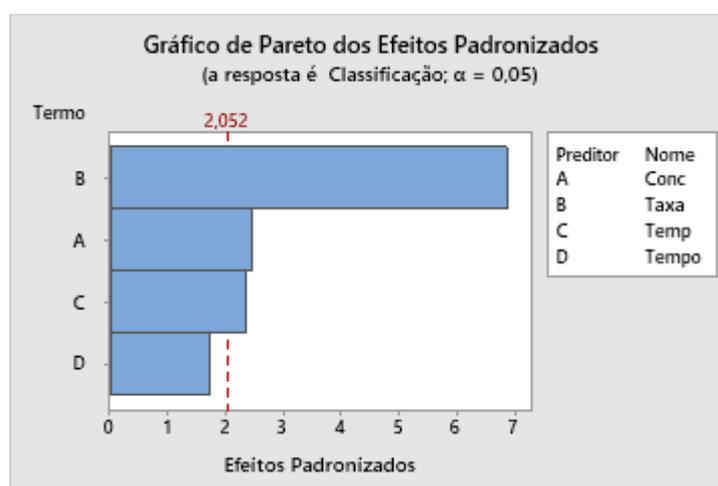
- O valor de  $R^2$  será sempre  $0 \leq R^2 \leq 1$ ;
- Quanto mais próximo de 1 for o valor de  $R^2$ , significa que uma grande parte da variação da variável dependente é explicada linearmente pelas variáveis independentes;
- Quanto mais próximo de 0 for o valor de  $R^2$ , significa que uma grande parte do comportamento da variável dependente não é correlacionado linearmente pelas variáveis independentes.

Este coeficiente pode ser utilizado como uma medida de segurança e qualidade da equação de regressão encontrada, pois quanto mais próximo de 1 for  $R^2$  mais adequado será o modelo encontrado (HENRIQUES, 2011).

### 2.11.1 Interpretação dos Principais Resultados de um Modelo de Regressão

A primeira etapa que deve ser realizada para a interpretação de um modelo de regressão é: determinar quais termos mais contribuem para a variabilidade da resposta. Essa análise pode ser realizada através de um gráfico de Pareto, que compara a significância estatística dos termos com a magnitude relativa, como no exemplo da Figura 13 (MINITAB, 2021).

**Figura 13 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados**



Fonte: Minitab (2021)

De acordo com Hair Jr. *et al.*(2009), um termo possui significância estatística apenas se o nível de significância ( $\alpha$ ) for igual ou menor a 0,05, que é exatamente onde está traçada a linha vermelha na Figura 13, mostrando que os termos A, B e C possuem relevância estatística enquanto o termo D ficou abaixo do mínimo necessário.

A segunda etapa a ser realizada consiste em determinar se a associação entre o termo e a resposta final é estatisticamente significativa, para isso é necessário comparar o valor-p com o nível de significância, com a intenção de analisar a hipótese nula que enuncia que não há nenhuma associação entre a resposta final e o termo analisado (MINITAB, 2021). De acordo com Hair Jr. *et al.* (2009), o valor-p representa a probabilidade de se obter um valor estatístico maior ou igual ao encontrado, ou seja, um valor que rejeita a hipótese nula.

Então, tem-se que se o valor-p for menor ou igual ao nível de significância a associação é estatisticamente significativa. Caso o valor-p seja maior que o nível de

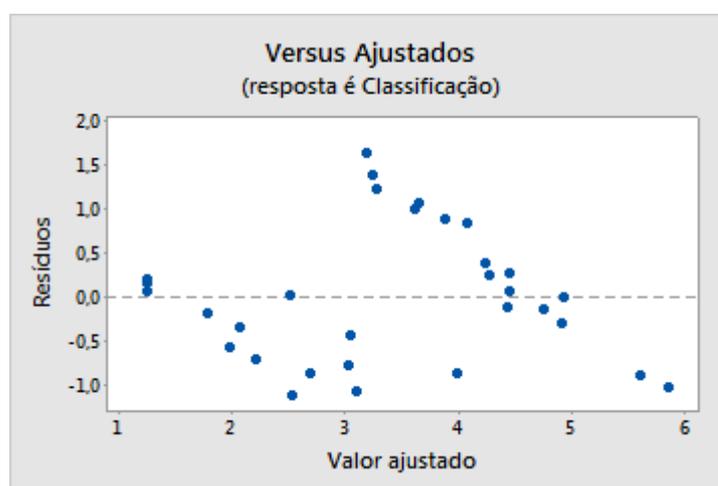
significância a associação não é estatisticamente significativa, e pode ser necessário retirar o termo do modelo final (MINITAB, 2021).

A terceira etapa necessária para interpretação é: determinar quão bem o modelo se adapta aos seus dados. Essa análise é realizada de acordo com os valores encontrados de  $R^2$ , sendo que quanto mais próximo de 100% ele estiver, melhor o modelo se ajusta aos seus dados. Outro dado interessante de ser avaliado é o  $R^2$  preditivo, que demonstra quão bem o modelo encontrado prediz as respostas para novos bancos de dados (MINITAB, 2021). De acordo com Hair Jr. *et al.* (2009), ótimos modelos estatísticos possuem um poder de análise de pelo menos 80%, ou seja,  $R^2$  maior ou igual a 80%.

A última etapa a ser realizada para a interpretação da regressão é: determinar se o modelo atende às suposições da análise. Para isso é necessária a análise dos gráficos dos resíduos, que representam uma parte da variável dependente que não pode ser explicada por uma técnica multivariada (MINITAB, 2021).

O primeiro gráfico a ser analisado é o gráfico de resíduos versus de ajustes, que está representado na Figura 14.

**Figura 14 - Gráfico de resíduos versus de ajustes**

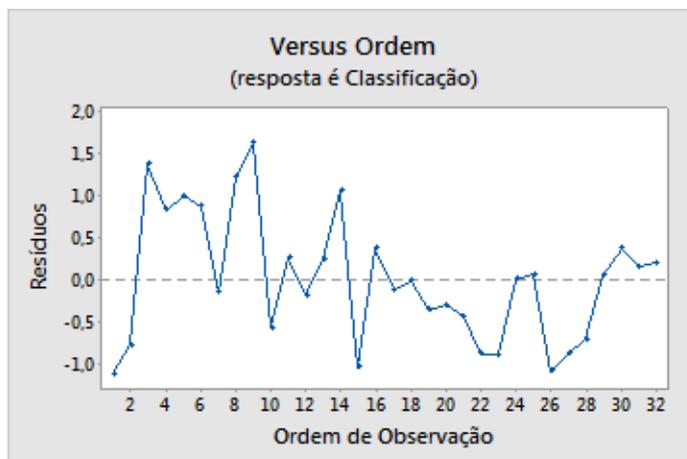


**Fonte: Minitab (2021)**

No gráfico da Figura 14, deve ser analisada a pressuposição de que os resíduos possuem variância constante e são aleatoriamente distribuídos. Os pontos devem estar distribuídos em torno do valor zero sem nenhum padrão reconhecível, sendo que se houver algum ponto muito distante de zero ele pode ser considerado um *outlier* que deve ser removido do banco de dados (MINITAB, 2021).

O próximo gráfico a ser analisado é o de resíduos versus ordem, que segue a distribuição da Figura 15.

**Figura 15 - Gráfico de resíduos versus ordem**

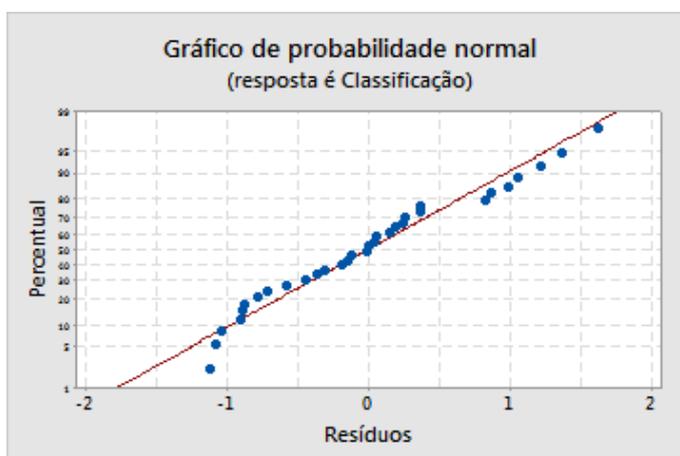


Fonte: Minitab (2021)

Na Figura 15 verifica-se o pressuposto que enuncia se os resíduos são independentes um do outro, ou seja, não podem demonstrar nenhum padrão ou tendência no gráfico, sendo distribuídos de forma completamente aleatória em torno da linha central (MINITAB, 2021).

Por fim, o gráfico de probabilidade normal deve ser analisado, conforme Figura 16, e deve seguir aproximadamente uma reta, sendo que valores muito distantes da linha central são determinados *outliers* que podem ser retirados do banco de dados (MINITAB, 2021).

**Figura 16 - Gráfico de probabilidade normal**



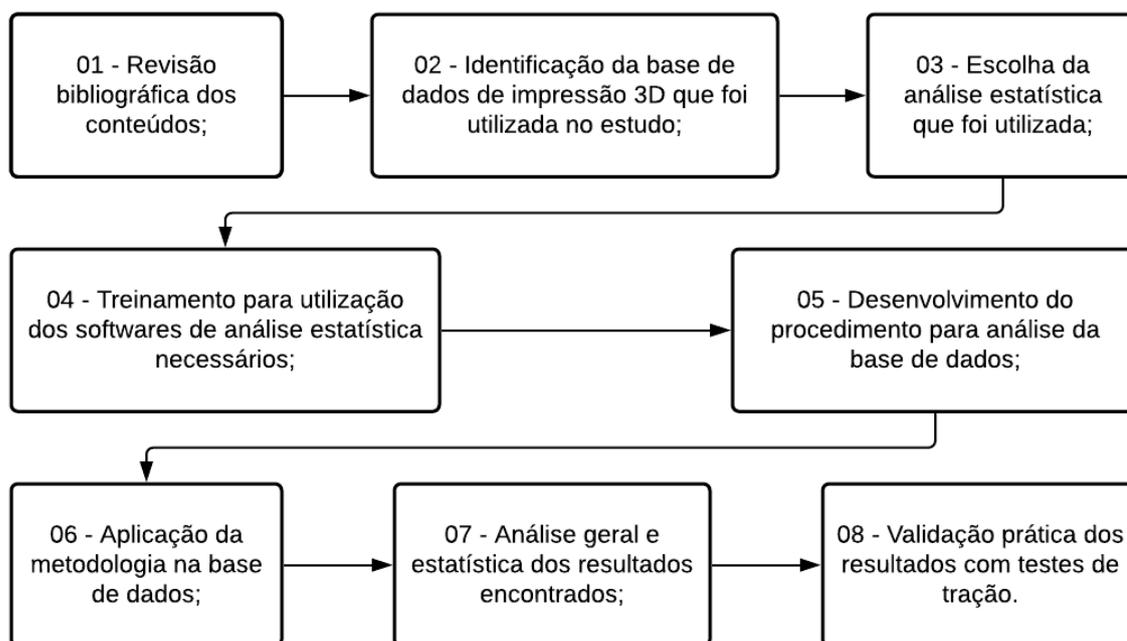
Fonte: Minitab (2021)

Ao realizar as 4 etapas de interpretação dos principais resultados de uma regressão, é possível encontrar uma resposta final para o modelo e avaliá-lo como um bom ou ruim modelo de regressão.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 17 apresenta os oito passos da metodologia que será utilizada para a realização do trabalho.

**Figura 17 - Fluxograma da metodologia**



**Fonte: Autores (2021)**

Na próxima seção, estão descritos todos os oito passos da metodologia.

#### 3.1 METODOLOGIA GERAL

Essa seção apresenta a metodologia adotada para a redação deste trabalho, bem como para o desenvolvimento da análise estatística e dos ensaios de tração.

##### 3.1.1 Revisão Bibliográfica dos Conteúdos

Foi feita a busca e seleção das referências bibliográficas para o embasamento geral deste trabalho. Como já citado anteriormente, os principais temas de estudo foram: indústria 4.0, manufatura aditiva, ensaio de resistência à tração, *Big Data*, *Data Analytics*, análise estatística multivariada e regressão linear múltipla.

### 3.1.2 Identificação da Base de Dados de Impressão 3D

O estudo foi baseado em uma base de dados de impressão 3D que foi coletada de um banco específico e público de *Big Data*, encontrado no site Kaggle. A base apresenta todos os principais parâmetros de fabricação e os dados de tensão máxima suportada pelas peças, o que permite a realização das análises necessárias para o cumprimento dos objetivos do trabalho.

### 3.1.3 Escolha da Análise Estatística a Ser Utilizada

De acordo com o fluxograma de Hair Jr *et al.* (2009) de seleção de uma técnica multivariada, a técnica de regressão linear múltipla foi escolhida para ser utilizada no presente trabalho. Pois, ela se encaixa em todos os requisitos de análise necessários para a resolução do problema.

### 3.1.4 Treinamento Para Utilização dos Softwares de Análise Estatística

De acordo com o modelo de trabalho proposto e o tipo de análise escolhida, identificou-se o software de análise estatística mais apropriado para solução do problema. O software escolhido foi o Minitab, pois é uma ferramenta estatística completa e que atende grande parte do mercado de trabalho que necessita de soluções estatísticas. É uma ferramenta de análise que tem como objetivo auxiliar na previsão, visualização e análise de dados com uma interface intuitiva e de fácil aprendizado, essenciais para a sua escolha.

### 3.1.5 Desenvolvimento do Procedimento Para Análise da Base de Dados

Para desenvolver o procedimento de análise estatística foi utilizada a metodologia de Hair Jr *et al.* (2009) que segue os seguintes passos:

1. Definição do problema da pesquisa, dos objetivos e da técnica multivariada a ser usada;
2. Desenvolvimento do plano de análise;
3. Avaliação das suposições inerentes à técnica multivariada;

4. Estimação do modelo multivariado e avaliação do ajuste geral do modelo;
5. Interpretação das variáveis estatísticas;
6. Validação do modelo multivariado.

### 3.1.6 Aplicação do Procedimento na Base de Dados

Após desenvolvido o procedimento, a análise foi aplicada na base de dados de impressão 3D selecionada, resultando em uma solução final que correlaciona os dados de entrada com os dados de saída por meio da regressão linear múltipla.

### 3.1.7 Análise Geral e Estatística dos Resultados Encontrados

Após realizada a aplicação do procedimento desenvolvido na base de dados escolhida, os resultados encontrados foram analisados para comprovar a sua assertividade e extrair todas as possíveis conclusões.

### 3.1.8 Validação Prática dos Resultados com Testes de Tração

Após aplicação e análise da metodologia aplicada na base de dados, foi realizada uma validação empírica dos resultados encontrados. Dezoito corpos de prova foram fabricados por meio da manufatura aditiva e foram testados em um ensaio de tração. Por fim, foi feita a comparação entre os valores teóricos e os valores reais encontrados nos testes.

## 3.2 MATERIAIS E MÉTODOS PARA ENSAIO DE TRAÇÃO

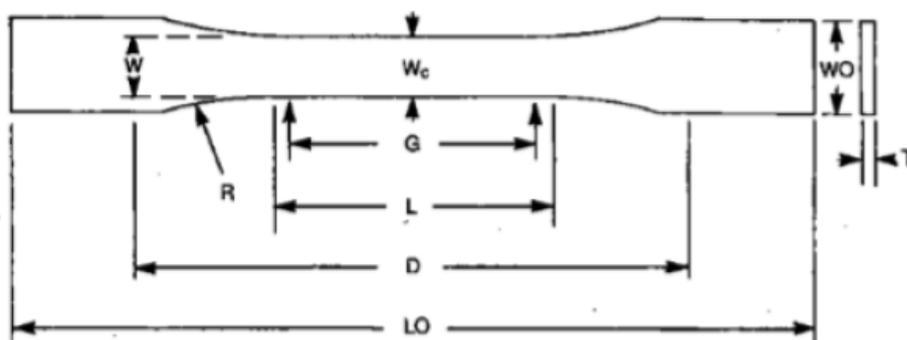
Essa seção apresenta os materiais e métodos utilizados para a realização do ensaio de tração.

### 3.2.1 Corpos de Prova para Ensaio

Para realizar o ensaio de tração, a geometria e as dimensões do corpo de prova precisam ser definidas. Neste trabalho, as definições seguiram o Método de Teste Padrão para Propriedades de Tração de Plásticos ASTM D 638-02a. Ainda foi

definido que a geometria tipo 1, dentro das 4 opções descritas pela norma, seria utilizada, por conta da dimensão da sua seção transversal. Na Figura 18 tem-se a geometria do corpo de prova.

Figura 18 - Geometria do corpo de prova



Fonte: ASTM D 638-02a (2002)

De acordo com a norma podem ser visualizadas na Tabela 2 as dimensões para as cotas da Figura 18.

Tabela 2 - Dimensões do corpo de prova

Dimensão	Símbolo	Valor [mm]
Largura	W	13
Largura de centro	Wc	13
Largura de aperto	WO	19
Comprimento da seção estreita	L	57
Comprimento de via	G	50
Espessura da seção	t	4
Distância entre apertos	D	115
Comprimento total	LO	165
Raio de arredondamento	R	76

Fonte: Adaptado da norma ASTM D 638-02a (2002)

Todos os CPs utilizados nos ensaios de tração foram impressos seguindo todas as recomendações da norma ASTM D 638-02a, com a geometria e dimensões especificadas anteriormente.

### 3.2.2 Equipamento para Ensaio de Tração

Para realização dos ensaios de tração foi utilizado o equipamento EMIC DL-2000, como apresentado na Figura 19, sendo que a célula de carga utilizada foi de 5000 N. O ensaio foi realizado no Laboratório de Ensaios Destrutivos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), no campus do Ecoville, em Curitiba.

**Figura 19 - Equipamento de ensaios universal EMIC DL-2000**



**Fonte: Autores (2021)**

O ensaio de tração seguiu as recomendações da norma ASTM D 638-02a, com utilização uma velocidade de 5 mm/min para realização dos testes. Ao final do ensaio são fornecidos os valores da tensão, força, deslocamento, tempo e os gráficos de tensão-deformação de cada corpo de prova.

### 3.3 MATERIAIS E MÉTODOS IMPRESSÃO 3D

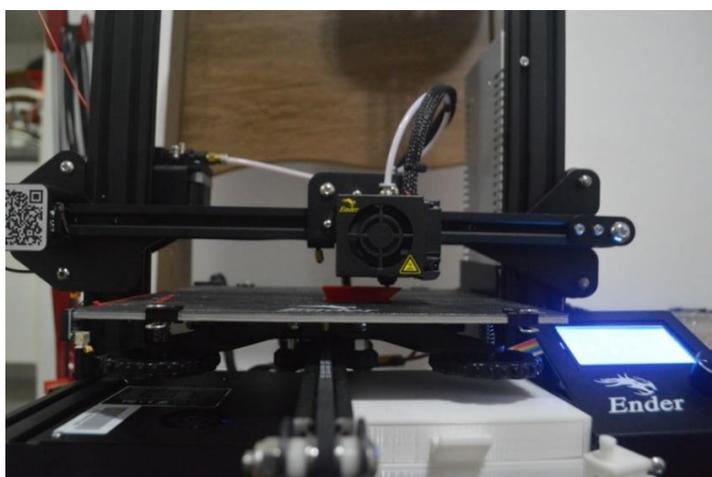
O objetivo de manufaturar os CPs e realizar o ensaio de tração foi validar experimentalmente os resultados obtidos por meio do procedimento de análise estatística desenvolvido no presente trabalho. Assim, a fabricação dos CPs

considerou todos os parâmetros avaliados neste trabalho, conforme apresentado nas seções seguintes.

### 3.3.1 Material de impressão

O software utilizado foi o Ultimaker Cura e a impressora foi a Ender 3, modelo da marca Creality, apresentada na Figura 20.

**Figura 20 - Impressora 3D utilizada**



Fonte: Ovenbird (2021)

Os materiais analisados foram o ABS e o PLA, comprados em rolos de filamentos apresentados na Figura 21.

**Figura 21 - Filamento de PLA**



Fonte: Ovenbird (2021)

Com os materiais utilizados, houve uma limitação na escolha dos parâmetros de impressão conforme apresentada no Quadro 1.

**Quadro 1 - Limitação na escolha dos parâmetros de impressão 3D**

Parâmetro de impressão	Limitação de impressão
Altura de camada	De 0,12 mm até 0,28 mm com resolução 0,4mm
Espessura de parede	Mínimo de 0,4 mm com resolução de 0,4 mm
Densidade de preenchimento	0% (apenas parede) até 100%
Temperatura do bico	Máximo 260°C
Temperatura da mesa	Máximo 110°C
Velocidade de impressão	Mínimo de 20 mm/s e máximo de 150 mm/s
Padrão de impressão	Somente <i>grid</i>
Material de impressão	PLA e ABS

Fonte: Autores (2021)

### 3.3.2 Parâmetros de impressão 3D

Para avaliação das Equações de Regressão encontradas e descritas nos resultados do trabalho, a escolha dos parâmetros de impressão foi dada da seguinte forma:

- Altura de camada, espessura de parede e densidade de preenchimento: maior, menor e valor intermediário dentro do intervalo analisado;
- Padrão de preenchimento: *grid*, devido às limitações de impressão;
- Temperatura de bico, temperatura de mesa e velocidade de impressão: variáveis escolhidas a fim de avaliar separadamente a influência de cada um desses parâmetros.
- Material: PLA e ABS;

Com os critérios definidos e as limitações de impressão apresentadas, nove modelos de CPs foram escolhidos e impressos duas vezes, A e B, para evitar erros durante os ensaios de tração, resultando em dezoito CPs ao total. A Tabela 3 apresenta os parâmetros de impressão de cada um dos CPs.

**Tabela 3 - Parâmetros de impressão 3D**

CP	AC [mm]	EP [mm]	DP %	PP	TB [° C]	TM [°C]	VI [mm/s]	M
1A e 1B	0,2	4,8	90	<i>grid</i>	200	80	40	PLA
2A e 2B	0,16	2,4	50	<i>grid</i>	210	70	60	PLA
3A e 3B	0,12	1,2	10	<i>grid</i>	220	60	120	PLA
4A e 4B	0,2	4,8	90	<i>grid</i>	220	80	40	ABS
5A e 5B	0,16	2,4	50	<i>grid</i>	230	70	60	ABS
6A e 6B	0,12	1,2	10	<i>grid</i>	250	60	120	ABS
7A e 7B	0,2	4,8	90	<i>grid</i>	220	80	40	PLA
8A e 8B	0,2	4,8	90	<i>grid</i>	200	60	40	PLA
9A e 9B	0,2	4,8	90	<i>grid</i>	200	80	120	PLA

**Fonte: Autores (2021)**

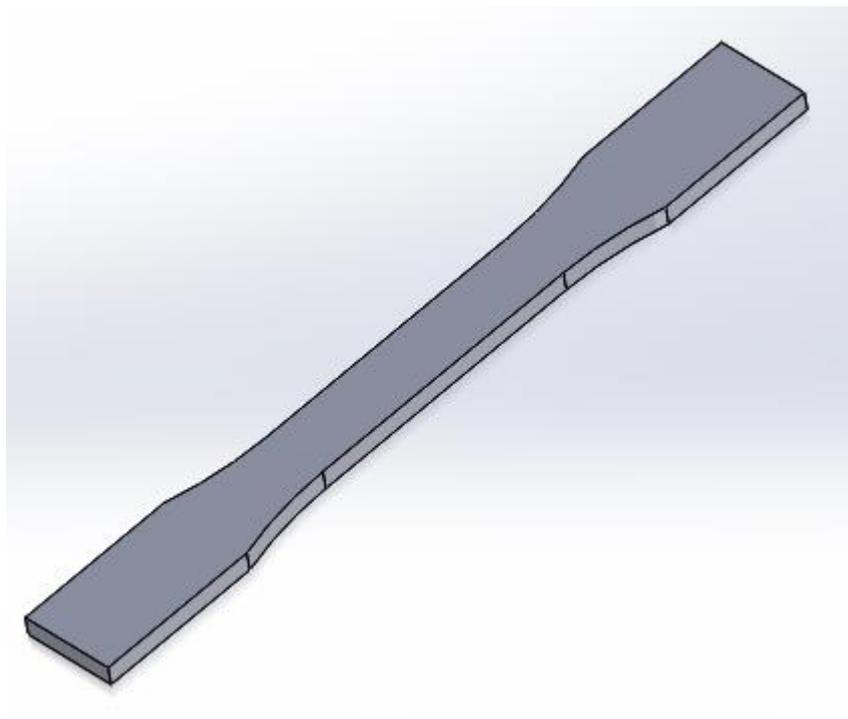
De forma que:

- AC é Altura de Camada;
- EP é a Espessura de Parede;
- DP é a Densidade de Preenchimento;
- PP é o Padrão de Preenchimento;
- TB é a Temperatura do Bico;
- TM é a Temperatura da Mesa;
- Vi é a Velocidade de Impressão;
- M é o Material.

Os modelos de 1 a 6 dos CPs foram utilizados para avaliação das Equações de Regressão enquanto os CPs 7, 8 e 9 para avaliação separadamente da temperatura do bico, temperatura da mesa e da velocidade de impressão respectivamente, tendo o CP 1 como controle.

Com os parâmetros de impressão definidos e com as dimensões pela norma ASTM D 638-02a, um modelo em 3D do CP foi criado e convertido para o formato STL, como mostra a Figura 22. No APÊNDICE A se encontra o desenho técnico do CP gerado.

**Figura 22 - Modelo 3D do CP**



**Fonte: Autores (2021)**

Por fim, as impressões 3D foram realizadas, resultando nos CPs prontos para a realização do ensaio de tração.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os resultados do presente trabalho, incluindo a identificação e preparação do banco de dados, o procedimento de análise elaborado, as impressões 3D, o ensaio de tração e a validação empírica e estatística dos resultados encontrados.

### 4.1 IDENTIFICAÇÃO E PREPARAÇÃO DO BANCO DE DADOS

O banco de dados escolhido e utilizado neste trabalho foi retirado do site Kaggle, que é uma comunidade na qual profissionais e cientistas de dados podem compartilhar informações e bases de dados sobre qualquer assunto. O banco de dados escolhido para este estudo se chama *3D Printer Dataset for Mechanical Engineers* e foi compartilhado pelo departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Selcuk da Turquia.

O banco de dados possui 8 parâmetros de impressão 3D de entrada, ou seja, variáveis independentes, que são: altura da camada, espessura da parede, densidade de preenchimento, padrão de preenchimento, temperatura do bico, temperatura da mesa, velocidade de impressão e material. Além disso, ele apresenta 3 parâmetros de impressão 3D de saída, ou seja, variáveis dependentes, que são: rugosidade, tensão máxima suportada e alongamento. Apenas a tensão máxima, também chamada de tensão última, suportada será utilizada como variável de saída neste trabalho, pois as outras duas não são relevantes para o estudo em questão.

Foi realizada uma análise descritiva no Minitab, como é possível notar na Tabela 4, para obter-se um maior entendimento do banco de dados escolhido.

**Tabela 4 - Estatísticas descritivas**

Variável	Quantidade	Média	Desvio Padrão	Variância	Mediana
Altura da Camada [mm]	50	0,106	0,0644	0,00415	0,1
Espessura da Parede [mm]	50	5,22	2,923	8,542	5
Densidade de Preenchimento [%]	50	53,4	25,36	643,31	50
Temperatura do bico [Cº]	50	221,5	14,82	219,64	220
Temperatura da mesa [Cº]	50	70	7,14	51,02	70
Velocidade de impressão [mm/s]	50	64	29,69	881,63	60
Tensão última [MPa]	50	20,08	8,93	79,67	19

Fonte: Autores (2021)

Na Tabela 4 observa-se que cada variável tem sua própria escala, com as médias que variam de 0,106 até 221,5, resultando em análises incoerentes com a realidade, com grandes erros e baixa confiabilidade.

Após a identificação e entendimento da base de dados, foi aplicada uma normalização Mín-Máx em todas as variáveis numéricas de entrada com o objetivo de transformar os dados para uma escala comum entre eles, sem perder informações ou distorcer a diferença dos intervalos entre os pontos. Sendo que para a variável temperatura do bico foram realizadas duas normalizações Mín-Máx, uma para o ABS e outra para o PLA, pois a escala de temperatura usada para cada material é diferente. Tanto a base de dados original quanto a base de dados já normalizada se encontram nos APÊNDICES C e D, respectivamente.

Após a normalização dos dados, foi realizada a análise descritiva do novo banco de dados, conforme Tabela 5.

**Tabela 5 - Estatísticas descritivas do banco de dados normalizado**

Variável	Quantidade	Média	Desvio Padrão	Variância	Mediana
Altura da Camada [mm]	50	0,4778	0,3578	0,128	0,4444
Espessura da Parede [mm]	50	0,4689	0,3247	0,1055	0,4444
Densidade de Preenchimento [%]	50	0,5425	0,317	0,1005	0,5
Temperatura do bico [C°]	50	0,43	0,2964	0,0879	0,4
Temperatura da mesa [C°]	50	0,5	0,3571	0,1276	0,5
Velocidade de impressão [mm/s]	50	0,3	0,3712	0,1378	0,25
Tensão última [Mpa]	50	20,08	8,93	79,67	19

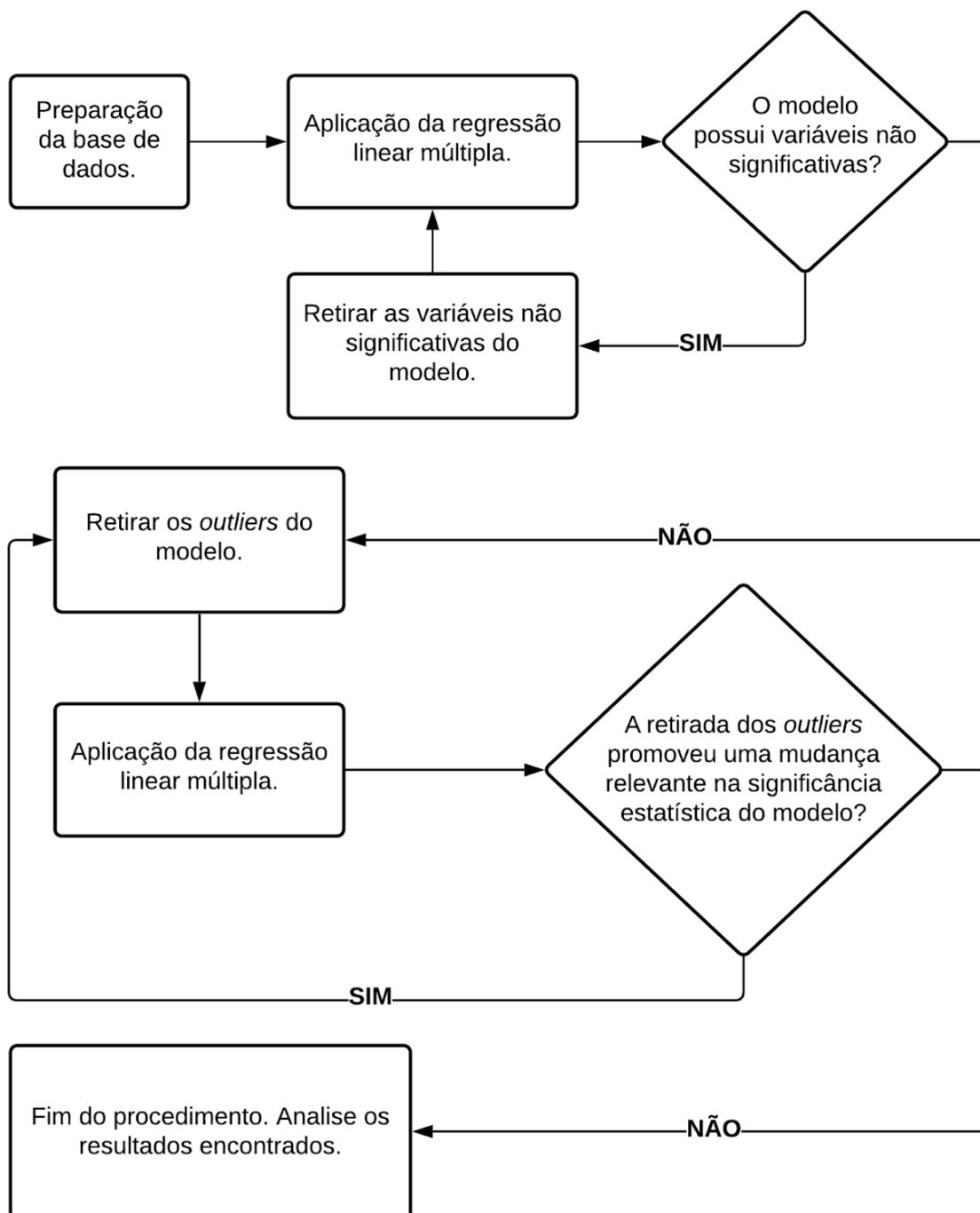
**Fonte: Autores (2021)**

Conforme a Tabela 5, percebe-se que todos os valores numéricos de entrada estão na mesma escala, o que facilita a análise por regressão linear múltipla.

## 4.2 PROCEDIMENTO DE ANÁLISE

O procedimento de análise desenvolvido segue os seguintes passos, como está representado na Figura 23.

Figura 23 - Fluxograma do procedimento de análise



Fonte: Autores (2021)

Com o banco de dados identificado e com a normalização Mín-Máx efetuada, o procedimento foi aplicado para determinar a influência dos parâmetros de impressão 3D na tensão máxima suportada pelo corpo de prova. Essa aplicação foi feita por meio

do software Minitab e, inicialmente, foi realizada uma regressão linear múltipla na base de dados obtida.

Como é possível notar na Figura 24, para esta primeira regressão, a resposta definida foi a tensão última, que se manterá como resposta para todas as iterações. Os preditores contínuos definidos são: altura da camada, espessura da parede, densidade de preenchimento, temperatura do bico, temperatura da mesa e a velocidade de impressão. Por fim, os preditores categóricos são: o padrão de preenchimento e o material.

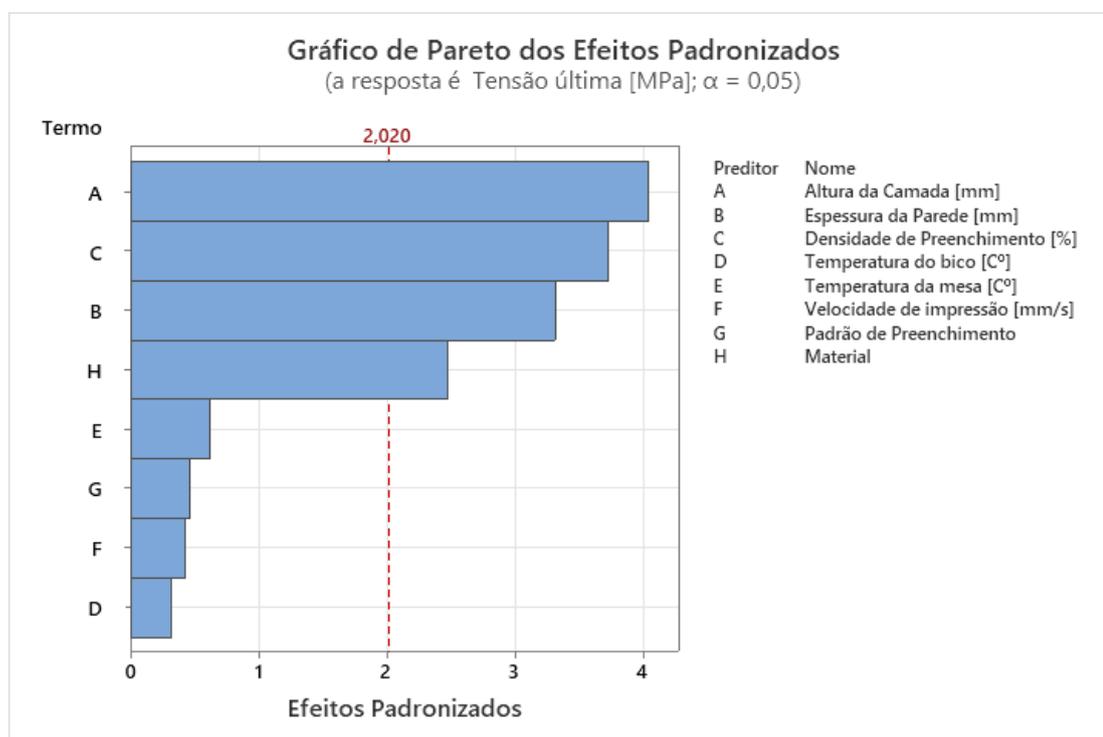
**Figura 24 - Categoria das variáveis na regressão**

The image shows the 'Regressão' dialog box in Minitab. On the left, a list of variables is shown: C1 (Altura da Camada), C2 (Espessura da Parede), C3 (Densidade de Preenchimento), C5 (Temperatura do Bico), C6 (Temperatura da Mesa), C7 (Velocidade de Impressão), and C9 (Tensão última [Mpa]). The 'Respostas:' field contains 'Tensão última [Mpa]'. The 'Preditores contínuos:' field contains 'Altura da Camada [mm]', 'Densidade de Preenchimento [%]', 'Temperatura do bico [C°]', and 'Velocidade de impressão [mm/s]'. The 'Preditores categóricos:' field contains 'Padrão de Preenchimento' and 'Material'. At the bottom, there are buttons for 'Modelo...', 'Opções...', 'Codificando...', 'Stepwise...', 'Validação...', 'Gráficos...', 'Resultados...', 'Armazenamento...', 'Ajuda', 'OK', and 'Cancelar'.

**Fonte: Autores (2021)**

Nesta primeira iteração, o resultado do coeficiente de determinação  $R^2$  foi igual a 60,98%. Além disso, nota-se no gráfico de Pareto da regressão, Figura 25, que algumas variáveis podem ser desconsideradas do cálculo, pois não possuem significância estatística, ou seja, o seu nível de significância ( $\alpha$ ) é maior do que 0,05.

**Figura 25 - Gráfico de Pareto da primeira regressão**



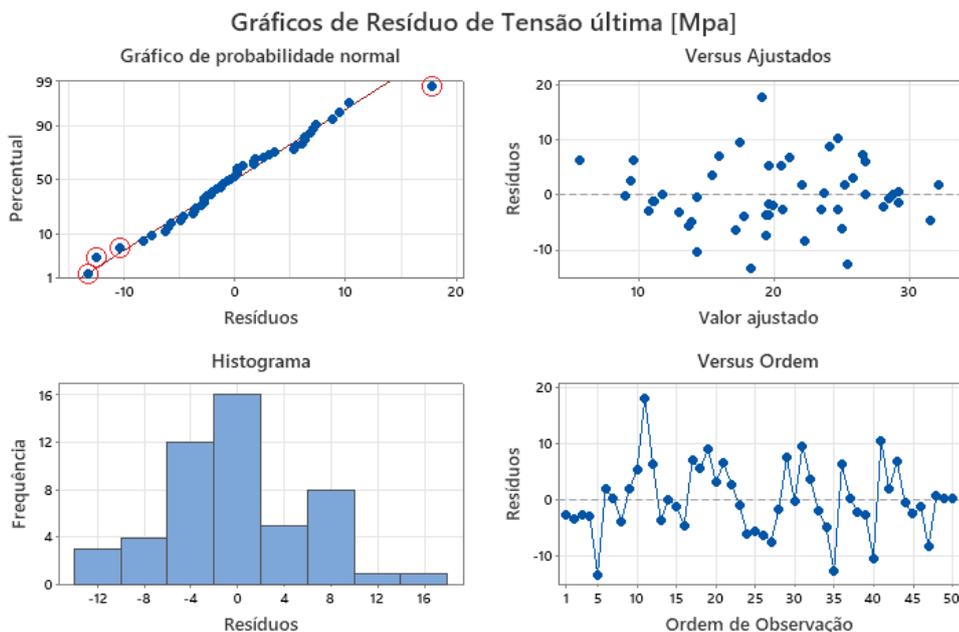
Fonte: Autores (2021)

Na Figura 25, todas as variáveis cujas barras não ultrapassaram a linha vermelha, que representa o limite do nível de significância, foram retiradas. Então, para a segunda iteração, não serão consideradas as variáveis: velocidade de impressão, padrão de preenchimento, temperatura do bico e temperatura da mesa.

Agora, para a segunda iteração da regressão, a resposta final continuará sempre sendo a tensão última, os preditores contínuos serão a altura da camada, a densidade de preenchimento e a espessura da parede, e o preditor categórico será o material utilizado.

Após realizada a regressão linear múltipla pela segunda vez, o valor de  $R^2$  encontrado foi de 54,62%. Além disso, é possível notar nos gráficos de resíduos da Figura 26 que existem alguns valores considerados como *outliers*, que devem ser retirados da regressão.

**Figura 26 - Gráficos de Resíduo de Tensão última na 2ª iteração**

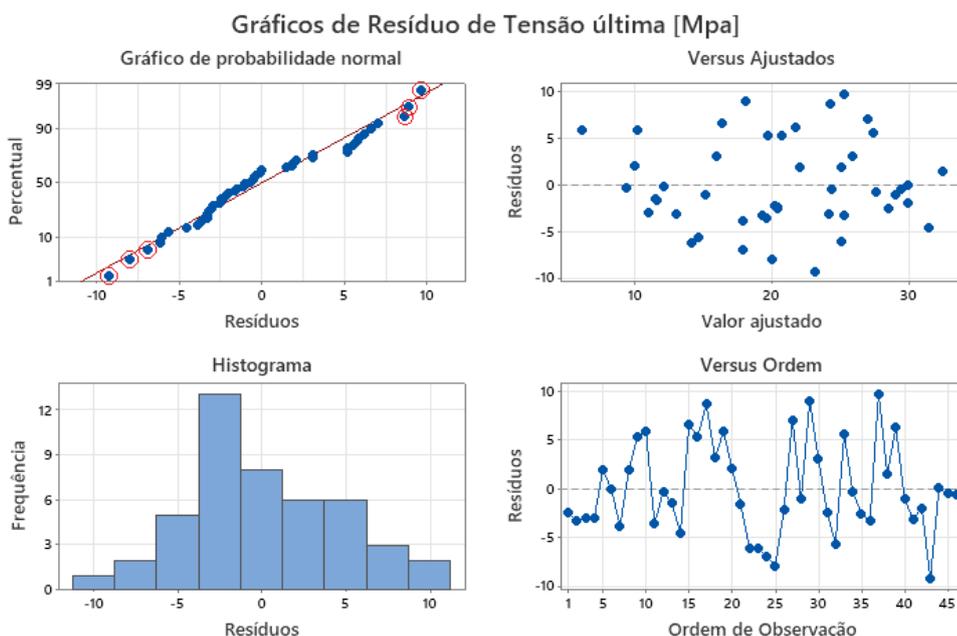


Fonte: Autores (2021)

Os pontos marcados em vermelho na Figura 26, que são as linhas 5, 11, 35 e 40, são *outliers* e serão retirados da equação na próxima iteração.

Após a retirada dos *outliers*, a terceira iteração foi realizada, tendo um resultado de  $R^2$  igual a 67,38% e gráficos de resíduos apresentados na Figura 27.

**Figura 27 - Gráficos de Resíduo de Tensão última na 3ª iteração**



Fonte: Autores (2021)

Novamente, foram marcados em vermelho os *outliers* encontrados no gráfico de resíduos de probabilidade normal, que serão retirados do modelo para a próxima iteração, sendo as linhas 17, 25, 29, 37 e 43, conforme Figura 27.

Por fim, foi realizada a quarta iteração da regressão linear múltipla, na qual os gráficos dos resíduos apresentaram bons padrões, não apresentando mais *outliers*. Assim, o procedimento foi finalizado na quarta iteração.

#### 4.3 RESULTADOS DO PROCEDIMENTO DE ANÁLISE

Após realizada a quarta iteração da regressão linear múltipla, obtiveram-se duas equações finais da regressão, pois a variável material do corpo de prova é um preditor categórico.

A Equação 17 prevê o valor máximo de tensão suportado pelo corpo de prova para peças impressas com o material ABS:

$$\begin{aligned} \text{Tensão máxima [Mpa]} = & 1,73 + 11,02 * \text{Altura da Camada} + \\ & 10,29 * \text{Espessura da Parede} + 8,56 * \text{Densidade de Preenchimento} \end{aligned} \quad (17)$$

Para peças impressas em PLA, a Equação 18 prevê o valor máximo de tensão suportado:

$$\begin{aligned} \text{Tensão máxima [Mpa]} = & 9,15 + 11,02 * \text{Altura da Camada} + \\ & 10,29 * \text{Espessura da Parede} + 8,56 * \text{Densidade de Preenchimento} \end{aligned} \quad (18)$$

É possível notar na Tabela 6, gerada no relatório final do Minitab, que todas as variáveis utilizadas nas equações finais são estatisticamente significativas, pois o valor-p encontrado para cada parâmetro foi menor do que 0,05.

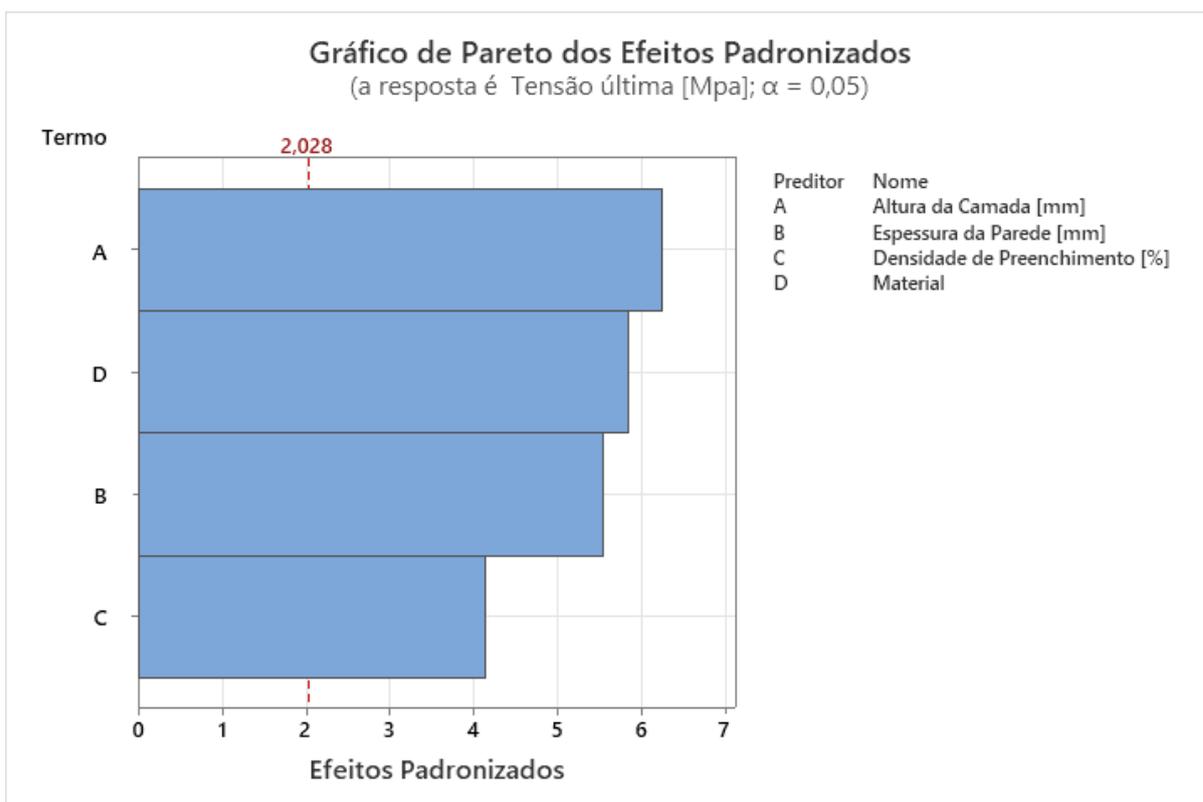
**Tabela 6 - Valor-p das variáveis**

Termo	Coefficiente	Valor-P
Constante	1,73	0,347
Altura da Camada [mm]	11,02	0,000
Espessura da Parede [mm]	10,29	0,000
Densidade de Preenchimento [%]	8,56	0,000
Material - pla	7,42	0,000

**Fonte: Autores (2021)**

A significância de todas as variáveis utilizadas no modelo também é comprovada pelo gráfico de Pareto, apresentado na Figura 28. Pois a linha vermelha traçada no gráfico, que delimita o valor mínimo para o qual as variáveis possuem um nível de significância relevante para o resultado, foi ultrapassada por todas as variáveis.

**Figura 28 - Gráfico de Pareto do resultado final**



**Fonte: Autores (2021)**

O resultado encontrado do coeficiente de determinação da equação ( $R^2$ ), que demonstra a assertividade do modelo de regressão para a base de dados utilizada foi:

$$R^2 = 78,05\%$$

Isso significa que para os valores dos parâmetros de impressão 3D contidos dentro da base de dados utilizada no estudo, o modelo encontrado explica 78,05% da variabilidade das respostas ao redor da sua média.

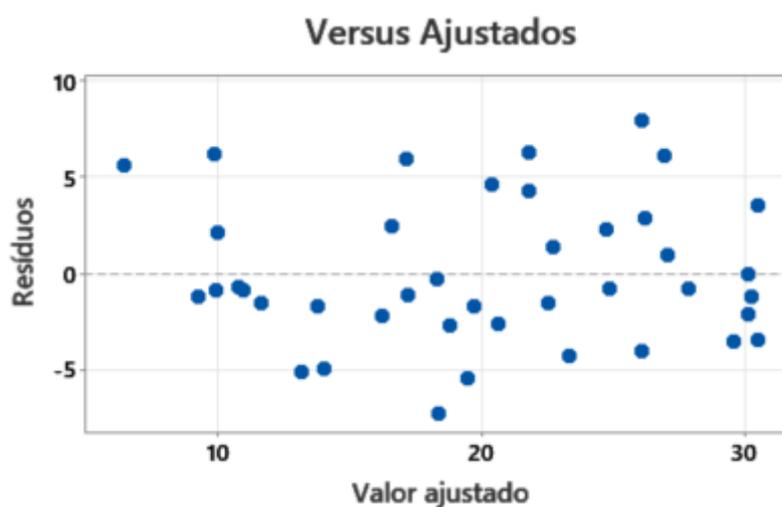
Além disso, também foi calculado o  $R^2$  preditivo, que demonstra a assertividade do modelo encontrado para valores dos parâmetros de impressão 3D que estejam fora da base de dados utilizada no estudo.

$$R^2 \text{ preditivo} = 71,40\%$$

Então, para outras bases de dados que possam ser testadas, o modelo encontrado explica 71,40% da variabilidade das respostas ao redor da sua média.

Por fim, foram gerados os gráficos dos resíduos para determinar se o modelo encontrado atende às suposições da análise. Na Figura 29 tem-se o gráfico de resíduos versus de ajustes.

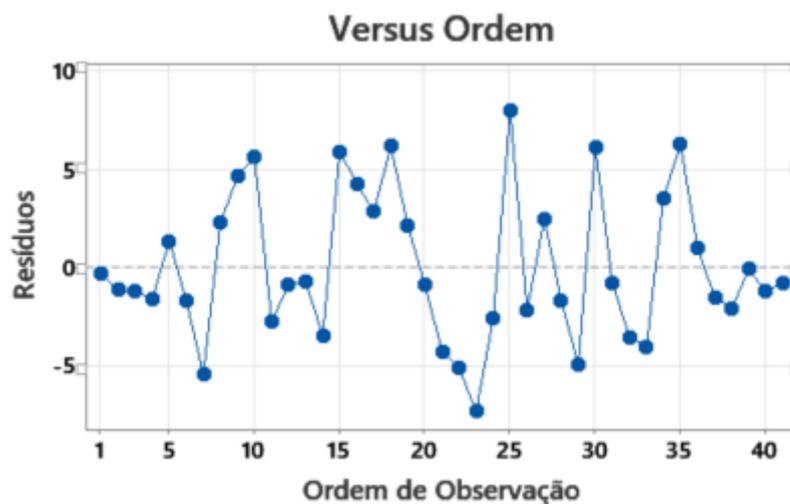
Figura 29 - Gráfico de resíduos versus de ajustes do modelo final



Fonte: Autores (2021)

Pode-se notar que os pontos no gráfico da Figura 29 estão distribuídos aleatoriamente e em torno do valor zero, sem nenhum ponto muito distante do zero e destoante dos demais. Na Figura 30 tem-se o gráfico de resíduos versus ordem.

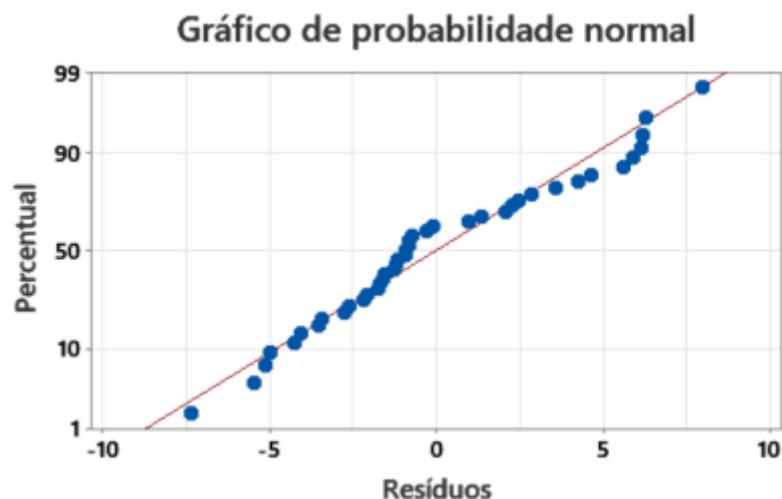
Figura 30 - Gráfico de resíduos versus ordem do modelo final



Fonte: Autores (2021)

Na Figura 30 pode-se observar que os resíduos são independentes um do outro e não apresentam nenhum padrão ou tendência de comportamento. Por fim, é necessária a interpretação do gráfico de probabilidade normal da Figura 31.

Figura 31 - Gráfico de probabilidade normal do modelo final



Fonte: Autores (2021)

Na Figura 31 é possível notar que os resíduos estão muito próximos da linha de tendência. Após toda a análise, pode-se concluir que estatisticamente o modelo de regressão encontrado é bom para prever os valores da tensão máxima suportada por um corpo de prova feito em impressão 3D.

#### 4.3.1 Aplicação das Equações de Regressão

As equações foram encontradas a partir do banco de dados transformado pela normalização Mín-Máx, portanto, para utilizá-las em uma análise preditiva da tensão última, essa transformação deve ser considerada. Isso é feito aplicando a Equação 2 para cada uma das variáveis numéricas, lembrando que as equações consideram somente altura de camada, espessura de parede e densidade de preenchimento.

Após as variáveis de entrada transformadas, elas necessariamente devem variar no intervalo entre 0 e 1. Conseqüentemente, para aplicar as equações, os parâmetros de impressão escolhidos devem estar dentro do intervalo entre o máximo e o mínimo valor para cada parâmetro no banco de dados original, conforme o Quadro 2 abaixo.

**Quadro 2 - Intervalo de cada parâmetro de impressão**

<b>Parâmetro</b>	<b>Variação</b>
Altura de Camada	0,02 mm até 0,2 mm
Espessura de Parede	1 mm até 10mm
Densidade de Preenchimento	10% até 90%

Fonte: Autores (2021)

Aplicando as Equações 17 e 18 nos parâmetros normalizados, as tensões últimas previstas são calculadas. A Tabela 7 abaixo mostra as tensões últimas previstas, obtidas dos resultados das Equações 17 e 18, as tensões últimas originais do banco de dados e o erro percentual encontrado, juntamente com os parâmetros originais de impressão do banco de dados e removendo os *outliers* para melhor visualização.

**Tabela 7 - Tensões Últimas Previstas**

(continua)

<b>Parâmetro de impressão</b>			<b>Tensão Real [Mpa]</b>	<b>Tensão Prevista [Mpa]</b>	<b>Erro %</b>
<b>AC [mm]</b>	<b>EP [mm]</b>	<b>DP %</b>			
0,02	8,00	90%	18	18,29	1,63%
0,02	7,00	90%	16	17,15	7,19%
0,02	1,00	80%	8	9,22	15,25%

(conclusão)

Parâmetro de impressão			Tensão Real [Mpa]	Tensão Prevista [Mpa]	Erro %
AC [mm]	EP [mm]	DP %			
0,02	6,00	90%	5	16,01	220,13%
0,02	10,00	40%	24	22,65	5,63%
0,02	5,00	10%	12	13,72	14,36%
0,02	10,00	10%	14	19,44	38,86%
0,02	9,00	70%	27	24,72	8,46%
0,06	6,00	80%	37	17,39	53,01%
0,06	2,00	20%	12	6,39	46,73%
0,06	10,00	50%	16	18,75	17,18%
0,06	6,00	10%	9	9,90	9,95%
0,06	3,00	50%	10	10,75	7,46%
0,06	10,00	90%	27	30,45	12,77%
0,06	3,00	40%	23	17,10	25,67%
0,06	5,00	80%	33	23,66	28,30%
0,06	10,00	50%	29	26,17	9,76%
0,10	1,00	40%	16	9,84	38,51%
0,10	2,00	30%	12	9,91	17,41%
0,10	1,00	50%	10	10,91	9,08%
0,10	9,00	80%	19	23,26	22,44%
0,10	2,00	60%	8	13,12	64,01%
0,10	4,00	40%	12	20,69	72,40%
0,10	3,00	50%	18	20,61	14,52%
0,10	4,00	90%	34	26,04	23,42%
0,15	4,00	50%	27	17,40	35,56%
0,15	6,00	50%	18	19,69	9,36%
0,15	7,00	80%	13	24,04	84,91%
0,15	3,00	80%	33	26,89	18,53%
0,15	4,00	50%	24	24,82	3,41%
0,15	10,00	30%	26	29,54	13,61%
0,20	4,00	80%	35	23,67	32,37%
0,20	9,00	90%	34	30,46	10,42%
0,20	7,00	30%	28	21,75	22,32%
0,20	6,00	90%	28	27,03	3,48%
0,20	3,00	80%	21	22,53	7,27%
0,20	4,00	20%	14	24,67	76,21%
0,20	5,00	60%	30	30,09	0,31%
0,20	7,00	40%	29	30,24	4,28%
0,20	3,00	60%	27	27,81	2,99%

Fonte: Autores (2021)

O erro médio das previsões realizadas é de 27,37%.

#### 4.4 RESULTADO DO PROCEDIMENTO DE IMPRESSÃO 3D

A produção dos dezoito CPs utilizados no ensaio de tração demorou um total de 25 horas e 54 minutos e custou um total de R\$ 39,40. A Tabela 8 a seguir dispõe o tempo de fabricação, sendo que cada par de CP com os mesmos parâmetros de impressão foram impressos juntos.

**Tabela 8 - Material e tempo gastos de impressão 3D**

CP	Material	Massa [g]	Tempo de impressão	
			Horas	Minutos
1A e 1B	PLA	27	3	47
2A e 2B	PLA	22	2	30
3A e 3B	PLA	14	1	43
4A e 4B	ABS	24	3	47
5A e 5B	ABS	20	2	49
6A e 6B	ABS	13	1	42
7A e 7B	PLA	27	3	47
8A e 8B	PLA	27	3	47
9A e 9B	PLA	27	2	2
TOTAL		201	25	54

**Fonte: Autores (2021)**

O resultado do processo de impressão 3D foi a fabricação de dezoito CPs para realização do ensaio de tração conforme a norma ASTM D 638-02a. As dimensões da seção útil verificadas nos CPs após a fabricação foram medidas conforme a Tabela 9.

**Tabela 9 - Medidas da seção útil do CP de ensaio**

CP	Largura de Centro (Wc)	Espessura seção (t)	Unidade
1A	13,20	4,00	mm
1B	13,45	4,10	mm
1A	13,00	3,95	mm
1B	13,00	4,15	mm
1A	12,95	4,10	mm
1B	12,95	4,10	mm
1A	13,25	4,05	mm
1B	13,40	4,00	mm
1A	13,20	3,95	mm
1B	13,00	4,10	mm
1A	12,95	4,20	mm
1B	12,95	4,15	mm
1A	13,35	4,20	mm
1B	13,30	4,15	mm
1A	13,10	4,00	mm
1B	13,00	4,05	mm
1A	12,90	3,95	mm
1B	12,90	4,00	mm

Fonte: Autores (2021)

As dimensões de todos Cps estão dentro da tolerância aceita pela norma, de  $\pm 0,5$  mm para largura e  $\pm 0,4$  mm para espessura. A média da largura de centro (Wc) foi de 13,1028 mm, com desvio padrão de 0,1827 mm, e para a espessura (t) média de 4,0667 e desvio padrão de 0,0840 mm.

#### 4.4.1 Problemas de impressão

Durante a manufatura dos CPs, alguns corpos de prova sofreram empenamento no início da impressão, Figura 32. Isso ocorreu em corpos de ABS, que tem um ponto de fusão mais alto, devido ao resfriamento súbito que a peça tem na primeira camada que está em contato com a mesa. Com condições climáticas desfavoráveis, as baixas temperaturas afetaram o agregamento da peça na mesa, por mais que ela estivesse aquecida e em uma estufa para impressão de ABS.

**Figura 32 - Erro de impressão**



**Fonte: Ovenbird (2021)**

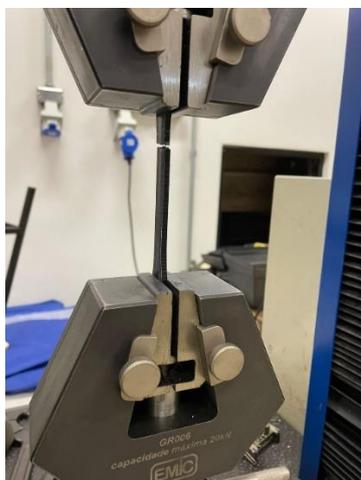
Esse defeito foi corrigido com o aumento da temperatura ambiente para, pelo menos, 15°C juntamente com alterações pontuais de parâmetros para a facilitação da primeira camada de impressão sendo:

- Velocidade de impressão: metade da velocidade definida para a impressão;
- Altura de camada: 0,2 mm por padrão, para facilitar a adesão;
- Facilitador de adesão: Brim – Recurso para facilitar adesão da primeira camada e impedir empenamento;
- Temperatura da mesa: sempre no mínimo 90° C para a primeira camada de ABS.

#### 4.5 RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO

Na Figura 33 o CP está fixado e fraturado após a aplicação da força de tração.

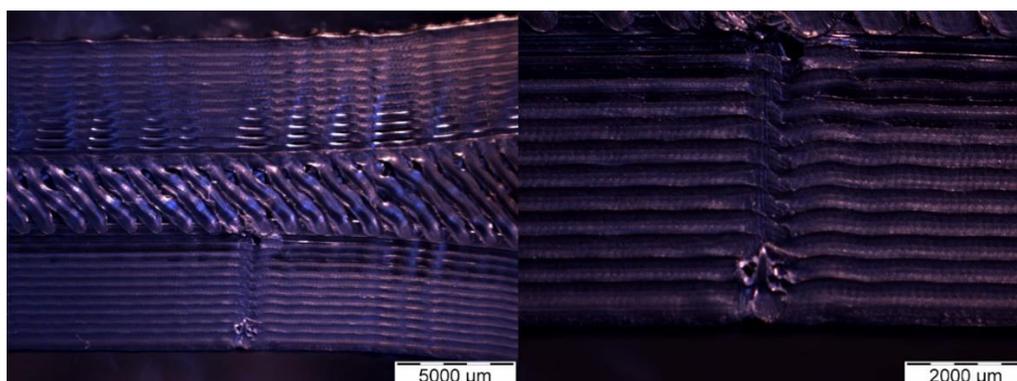
**Figura 33 - Ensaio de tração realizado**



**Fonte: Autores (2021)**

Dezessete CPs fraturaram na mesma região, provavelmente devido ao caminho percorrido pelo bico extrusor durante a impressão 3D, que gerou um possível concentrador de tensão apresentado na Figura 34 abaixo. Contudo, essa hipótese deve ser melhor investigada em trabalhos futuros.

**Figura 34 – Possível concentrador de tensão no CP 4B**

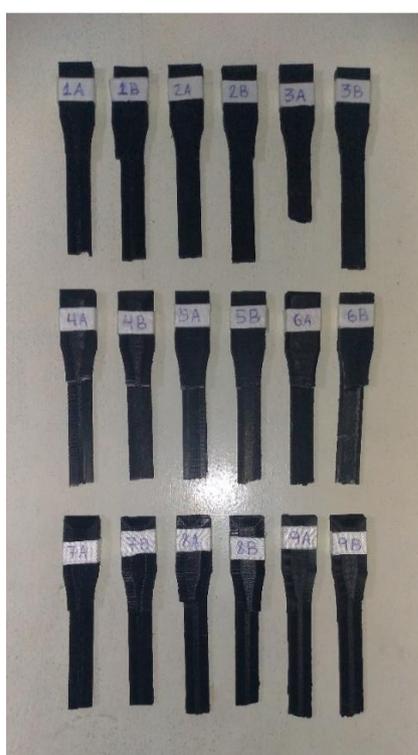


**Fonte: Autores (2021)**

Todos os CPs apresentaram esse defeito de impressão observado, sendo alguns mais e outros menos evidentes.

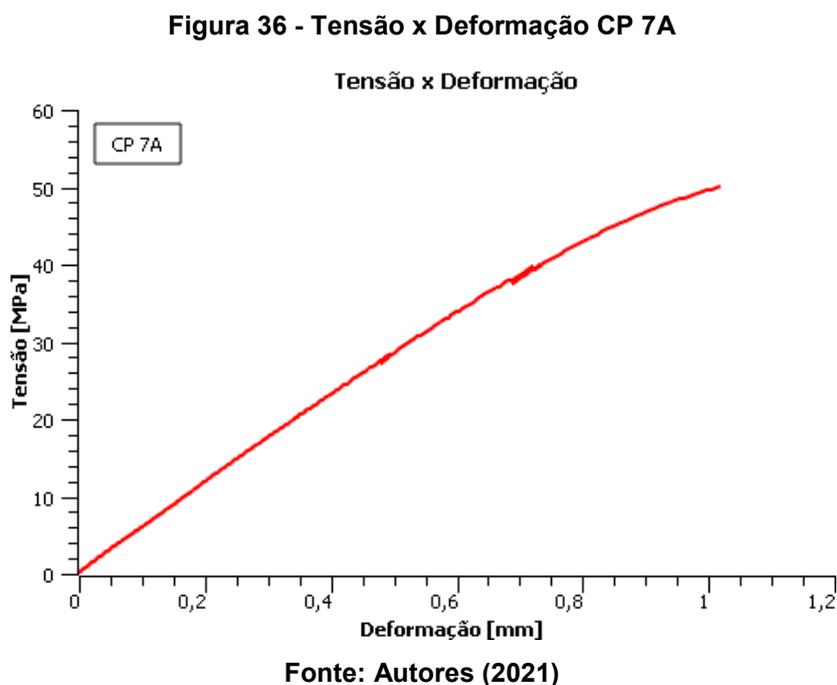
A Figura 35 a seguir apresenta todos os 18 CPs ensaiados e identificados.

**Figura 35 - CPs ensaiados**



**Fonte: Autores (2021)**

Com o ensaio realizado, o equipamento fornece os dados de força, tensão e deformação durante o tempo de tracionamento do CP. A maior tensão máxima efetiva foi encontrada no CP 7A, com 51,01 MPa. A Figura 36 apresenta o gráfico de Tensão x Deformação para o CP 7A.



A Figura 36 apresenta a curva tensão-deformação do CP 7A. Pode-se perceber que grande parte do comportamento da deformação é linear, sendo que o ponto de rompimento foi também o ponto da tensão máxima aplicada.

As demais figuras contendo os resultados de tensão x deformação estão presentes no APÊNDICE D, sendo que os CPs 3B e 4A apresentaram erros na medição da deformação e, por isso, a geração de seus gráficos não foi possível. Mesmo com os erros da medição da deformação, a tensão pode ser medida em todos os ensaios. Na Tabela 10 abaixo estão apresentados os dados de tensão efetiva máxima para cada CP.

**Tabela 10 - Resultados ensaio de tração**

CP	Tensão efetiva máxima (MPa)	CP	Tensão efetiva máxima (MPa)	Média
1A	42,67	1B	41,24	41,96
2A	33,56	2B	32,06	32,81
3A	20,64	3B	21,90	21,27
4A	21,53	4B	24,26	22,90
5A	17,74	5B	15,64	16,69
6A	11,78	6B	11,99	11,89
7A	51,02	7B	49,34	50,18
8A	45,01	8B	46,58	45,80
9A	45,43	9B	46,32	45,88

Fonte: Autores (2021)

Conforme a Tabela 10, o modelo que obteve a maior tensão máxima efetiva foi o CP 7, com a média de 50,18 MPa. Já o modelo que obteve a menor tensão máxima efetiva foi o CP 6, com média de 11,89 MPa. Além disso, a média geral de todas as tensões efetivas máximas foi de 32,15 MPa com desvio padrão de 14,36 MPa, indicando que os valores medidos não são homogêneos.

#### 4.5.1 Comparação com as tensões máximas previstas

As tensões máximas previstas com as Equações de Regressão, as médias encontradas para cada modelo de CP e os erros percentuais estão dispostos na Tabela 11 a seguir.

**Tabela 11 - Resultados dos ensaios e das previsões**

CP	Média da tensão efetiva máxima encontrada [Mpa]	Tensão Prevista [Mpa]	Erro %
1A e 1B	41,96	33,075	21,17%
2A e 2B	32,81	23,602	28,07%
3A e 3B	21,27	15,501	27,12%
4A e 4B	22,90	25,655	12,05%
5A e 5B	16,69	16,182	3,05%
6A e 6B	11,89	8,081	32,01%
7A e 7B	50,18	33,075	34,09%
8A e 8B	45,80	33,075	27,78%
9A e 9B	45,88	33,075	27,90%

Fonte: Autores (2021)

O erro médio encontrado entre a tensão máxima prevista e a tensão máxima efetiva ensaiada foi de 23,69%. Além disso, a ordem do CP mais resistente para o menos resistente foi a mesma tanto na tensão efetiva máxima encontrada quanto na tensão prevista.

#### 4.5.2 Influência das temperaturas do bico e mesa e velocidade de impressão

Os parâmetros de impressão dos CPs 7, 8 e 9 são exatamente iguais aos do CP 1, exceto pela temperatura de bico para o CP 7, a temperatura de mesa para o CP 8 e velocidade de impressão para o CP 9. A Tabela 12 a seguir mostra as diferenças nos resultados entre o CP 1 de controle e os CPs 7, 8 e 9.

**Tabela 12 - Influência da temperatura de bico, temperatura de mesa e velocidade de impressão**

CP	Média da tensão máxima efetiva [Mpa]	Parâmetro de impressão avaliado	Diferença %
CP1	41,96	-	-
CP7	50,18	Temperatura de bico	19,59%
CP8	45,80	Temperatura de mesa	9,15%
CP9	45,88	Velocidade de impressão	9,34%

**Fonte: Autores (2021)**

Na Tabela 12, a variável alterada que resultou na maior diferença de tensão máxima efetiva em relação ao CP de controle foi a temperatura de bico, com 19,59%. Como esse número é menor que o erro médio no modelo avaliado, que foi de 27,37%, a diferença que esses parâmetros causaram pode ser considerada não significativa.

Assim, tendo por base os resultados obtidos na comparação com o banco de dados avaliado e os resultados dos ensaios realizados, pode-se observar que as equações da regressão linear múltipla preveem com a assertividade esperada a tensão máxima dos CPs avaliados.

Por fim, a temperatura de bico, temperatura de mesa e velocidade de impressão foram comprovados empiricamente como não significativos para a tensão máxima dos CPs. Isso ocorre pelo fato de que, quando não geram defeitos de fabricação, esses parâmetros provavelmente influenciam somente em características estéticas e de tempo de fabricação. Todavia, essa hipótese deve ser melhor investigada em trabalhos futuros.

## 5 CONCLUSÃO

Este presente trabalho teve como objetivo a proposta de uma metodologia de análise estatística de um banco de dados de impressão 3D para determinar a influência dos parâmetros de impressão na resistência máxima à tração de uma peça fabricada por manufatura aditiva. Para isso, foi identificada a base de dados, criado o procedimento e analisados seus resultados com verificações estatísticas e empíricas.

A análise estatística escolhida foi a Regressão Linear Múltipla, resultando em um  $R^2$  de 78,05% e em duas equações de regressão, uma para o PLA e outra para o ABS. Ambas tiveram seus coeficientes iguais, exceto pela constante maior para o PLA, o que evidencia sua maior resistência à tração do que o ABS.

Esses coeficientes e seus resultados gerais puderam ser comprovados nos ensaios de tração, que obtiveram um erro médio das previsões menor do que o encontrado dentro do próprio banco de dados. Foi verificada, tanto estatística quanto empiricamente, que as únicas variáveis significativas na tensão última dos CPs são altura de camada, espessura de parede e densidade de preenchimento, sendo que, quanto maior esses parâmetros, mais resistente a peça fabricada.

Além disso, a velocidade de impressão foi identificada como não significativa na resistência à tensão de peças impressas em 3D. O que pode contribuir para diminuir o tempo de impressão de peças sem alterar sua resistência última.

Em suma, o trabalho cumpriu o objetivo proposto e contribuiu para o desenvolvimento das tecnologias da indústria 4.0.

Como sugestões para trabalhos futuros, identifica-se a necessidade de avaliar melhores caminhos de impressão para diminuir concentradores de tensão nas peças, avaliação de modelos para outros materiais e métodos de manufatura aditiva e estudos mais aprofundados das propriedades mecânicas e microestruturais do ABS e PLA impressos em 3D.

## REFERÊNCIAS

- 3DLAB. **Aprenda como escolher o tipo e percentual de preenchimento na impressão 3D!** [2019?]. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/preenchimento-na-impressao-3d/>>. Acesso em: 06 de agosto de 2021.
- ALBERTIN, M. R. *et al.* Principais inovações tecnológicas da indústria 4.0 e suas aplicações e implicações na manufatura. **XXIV Simpósio de Engenharia de Produção. Bauru**, 2017.
- ASKELAND, D.; WRIGHT, W. **Ciência e engenharia dos materiais**. 3 ed. São Paulo: Cengage Learning, 2015.
- ASTM D 638- 02a. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. United States, 2002.
- COELHO, P. M. N. **Rumo à indústria 4.0**. 2016. 62 f. Tese de Doutorado. Universidade de Coimbra. Coimbra, 2016.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). **Desafios para Indústria 4.0 no Brasil**. Brasília: CNI, 2016.
- DA CUNHA, L. S.; CARLOS, A. **Regressão linear múltipla. Análise multivariada: para os cursos de administração, ciências contábeis e economia**. São Paulo: Atlas, 2007.
- FAOUAKHIRI, R. **Impressão 3D: 6 coisas que você precisa saber para ter uma qualidade de impressão perfeita**, 2015. Disponível em: <<https://inovariumeducation.wordpress.com/2015/07/04/impressao-3d-6-coisas-que-voce-precisa-saber-para-ter-uma-qualidade-de-impressao-perfeita/>> Acesso em: 27 de julho de 2021.
- FERREIRA, R.; GOMES, J. S. **Projetos de Big Data Analytics: uma discussão à luz da Capacidade Absortiva**. Sustainable Business International Journal, n. 85, 2019.
- GERE, M.; GOODNO, J. **Mecânica dos materiais** – tradução da 7ª edição norte-americana. 7.ed. São Paulo: Cengage, 2010.
- GHASEMAGHAEI, M. **Does data analytics use improve firm decision making quality? The role of knowledge sharing and data analytics competency**. Decision Support Systems, v. 120, p. 14-24, 2019.
- GRAMES, E. **3D Printing Layer Height - How Much Does It Matter?** 2021. Disponível em: <<https://all3dp.com/2/3d-printer-layer-height-how-much-does-it-matter/>>. Acesso em 27 de julho de 2021.
- GROOVER, M. P. **Fundamentos da moderna manufatura**. Tradução Givanildo Alves dos Santos, Luiz Claudio de Queiroz. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2 v., 2017.

HAIR JR., J. F. *et al.* **Análise multivariada de dados**. 6 ed.- Porto Alegre: Bookman, 2009.

HENRIQUES, C. **Análise de regressão linear simples e múltipla**. Departamento de Matemática. Escola Superior de Tecnologia de Viseu. Portugal, 2011.

FLASHFORGE. **How to set the number of shells in the 3D printing software**, 2016. Disponível em: <<https://www.flashforge.com.hk/blog/how-to-set-the-number-of-shells-in-the-3d-printing-software>> Acesso em: 05 de agosto de 2021.

IMPRESORAS3D. **Que padrão você deve usar no preenchimento de sua figura 3D?** [2018?]. Disponível em: <<https://www.impresoras3d.com/pt/qual-padr%C3%A3o-voc%C3%AA-deve-usar-no-preenchimento-da-sua-figura-3d/>> Acesso em: 06 de agosto de 2021.

ISHWARAPPA, J.; ANURADHA, J. **A Brief Introduction on Big Data 5Vs Characteristics and Hadoop Technology**. vol. 48, pp. 319-324, 2015.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. **Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0**. Abril, 2013.

KAPPAL, S. **Data Normalization using Median & Median Absolute Deviation (MMAD) based Z-Score for Robust Predictions vs. Min–Max Normalization**. London Journal Press. v 19. p. 34 – 46, 2019.

MARQUESONE, R. F. P. **Big Data: Técnicas e tecnologias para extração de valor dos dados**. 1. ed. Casa do Código, 2016.

MINITAB. **Interpretar Os Principais Resultados Para Ajuste Do Modelo De Regressão**, 2021. Disponível em: <<https://support.minitab.com/pt-br/minitab/20/help-and-how-to/statistical-modeling/regression/how-to/fit-regression-model/interpret-the-results/key-results/?SID=112500>>. Acesso em: 24 de julho de 2021.

O'CONNELL, J. **10 Most Important 3D Printer Slicer Settings**, 2021. Disponível em: <<https://m.all3dp.com/2/3d-slicer-settings-3d-printer/>> Acesso em: 05 de agosto de 2021.

PRAKASH, K. S.; NANCHARAIH, T.; RAO, VV S. **Additive manufacturing techniques in manufacturing-an overview**. Materials Today: Proceedings, v. 5, n. 2, p. 3873-3882, 2018.

REPRAP. **Fused Filament Fabrication**, 2016. Disponível em: <[http://reprap.org/wiki/Fused\\_filament\\_fabrication](http://reprap.org/wiki/Fused_filament_fabrication)> Acesso em: 20 de julho de 2021.

RODRIGUES, V. P. *et al.* **Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações**. Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas, v. 12, n. 3, p. 1, 2017.

RÜSSMANN, M. *et al.* **Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries**, 2015. Disponível em: <[https://www.bcg.com/pt-br/publications/2015/engineered\\_products\\_project\\_business\\_industry\\_4\\_future\\_productivity\\_growth\\_manufacturing\\_industries](https://www.bcg.com/pt-br/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries)>. Acesso em: 29 mar. 2021.

SAKURAI, R.; ZUCHI, J. D. **As revoluções industriais até a indústria 4.0**. Revista Interface Tecnológica, v. 15, n. 2, p. 480-491, 2018. Disponível em: <<https://revista.fatectq.edu.br/index.php/interfacetecnologica/article/view/386>>. Acesso em: 19 abr. 2021.

SAMPAIO, C. **Guia maker de impressão 3D: teoria e prática consolidadas**, 2017. Disponível em: <<http://www.makerlinux.com.br/ebook>>. Acesso em: 21 de jun. de 2021.

SANTOS, L. *et al.* **Tipos de polímeros utilizados como matéria prima no método de manufatura aditiva por FDM: uma abordagem conceitual**. XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. A engenharia de produção e suas contribuições para o desenvolvimento do Brasil. Maceió. p. 2 out. 2018.

SARANYA, C; MANIKANDAN, G. **A Study on Normalization Techniques for Privacy Preserving Data Mining**. International Journal of Engineering and Technology. Vol 5. 3. jun-jul. 2013.

SCHWAB, K. **A quarta revolução industrial**. São Paulo: Edipro, 2016.

SILVA, P. C. *et al.* **Impressão 3D: Um guia prático**. Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 11, p. 84478-84493, 2020.

TAURION, C. **Big Data**. 3. ed. Rio de Janeiro: Brasport. Livros e Multimídia Ltda. 2013.

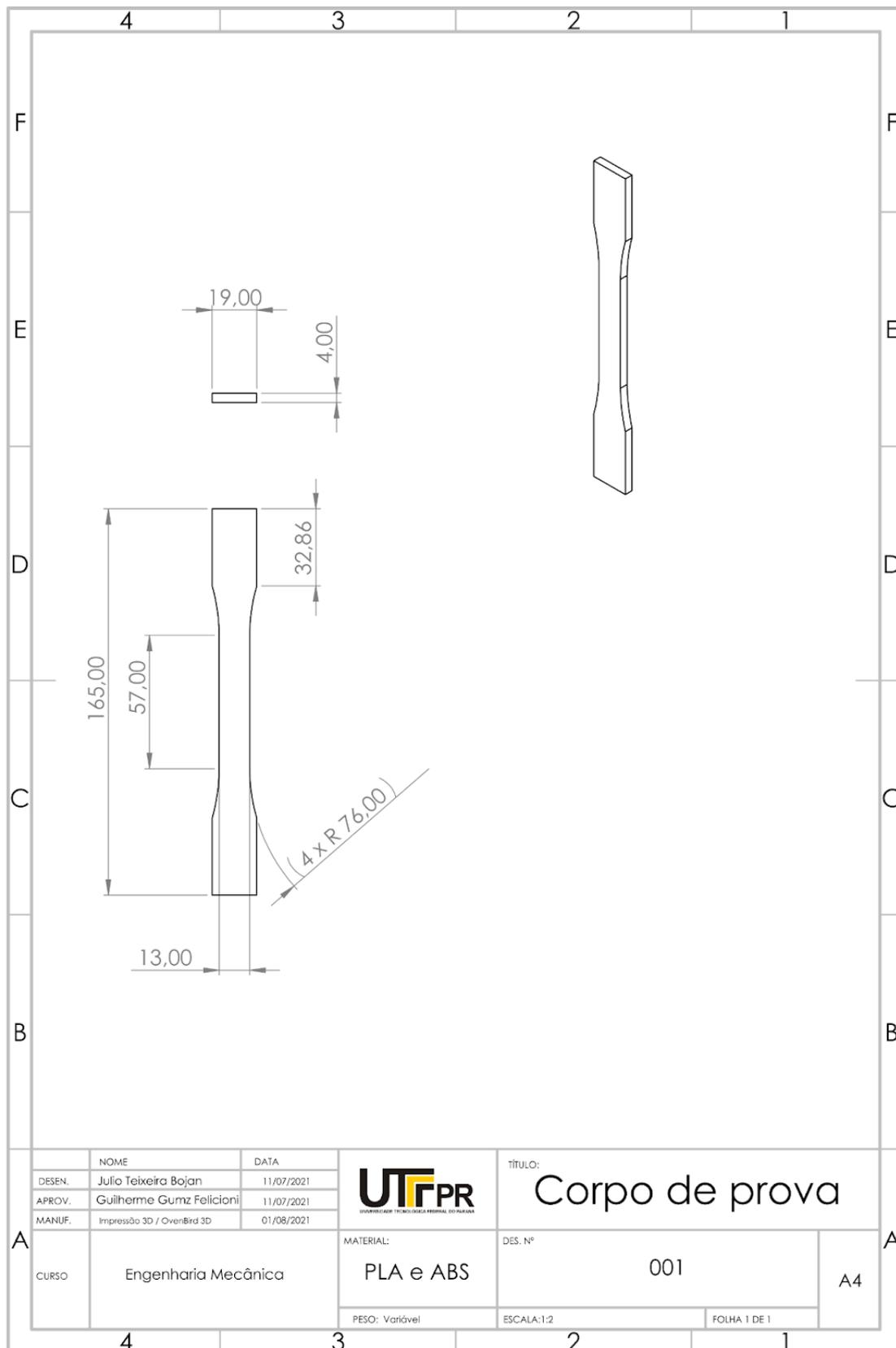
TECNICON. **4 Exemplos práticos da adoção da Indústria 4.0 nas fábricas**, 2020. Disponível em: <[https://www.tecnicon.com.br/blog/476-4-exemplos-praticos-da-adocao-da-Industria\\_4\\_0\\_nas-fabricas](https://www.tecnicon.com.br/blog/476-4-exemplos-praticos-da-adocao-da-Industria_4_0_nas-fabricas)>. Acesso em: 17 de julho de 2021.

VAZ, A. L. **Normalizar ou padronizar as variáveis?** 2019. Disponível em: <<https://medium.com/data-hackers/normalizar-ou-padronizar-as-vari%C3%A1veis-3b619876ccc9>> Acesso em: 11 de agosto de 2021.

VOLPATO, N. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2017.

WATSON, H. J. **Update Tutorial: Big Data Analytics: Concepts, Technology, and Applications**. Communications of the Association for Information Systems, 44, pp-pp. 2019.

## APÊNDICE A - DESENHO TÉCNICO DOS CORPOS DE PROVA



## APÊNDICE B - BASE DE DADOS DE IMPRESSÃO 3D

Altura da Camada [mm]	Espessura da Parede [mm]	Densidade de Preenchimento [%]	Padrão de Preenchimento	Temperatura do bico [°C]	Temperatura da mesa [°C]	Velocidade de impressão [mm/s]	Material	Tensão última [Mpa]
1	0,02	8	90 grid	220	60	40 abs	40 abs	18
2	0,02	7	90 honeycomb	225	65	40 abs	40 abs	16
3	0,02	1	80 grid	230	70	40 abs	40 abs	8
4	0,02	4	70 honeycomb	240	75	40 abs	40 abs	10
5	0,02	6	90 grid	250	80	40 abs	40 abs	5
6	0,02	10	40 honeycomb	200	60	40 pla	40 pla	24
7	0,02	5	10 grid	205	65	40 pla	40 pla	12
8	0,02	10	10 honeycomb	210	70	40 pla	40 pla	14
9	0,02	9	70 grid	215	75	40 pla	40 pla	27
10	0,02	8	40 honeycomb	220	80	40 pla	40 pla	25
11	0,06	6	80 grid	220	60	60 abs	60 abs	37
12	0,06	2	20 honeycomb	225	65	60 abs	60 abs	12
13	0,06	10	50 grid	230	70	60 abs	60 abs	16
14	0,06	6	10 honeycomb	240	75	60 abs	60 abs	9
15	0,06	3	50 grid	250	80	60 abs	60 abs	10
16	0,06	10	90 honeycomb	200	60	60 pla	60 pla	27
17	0,06	3	40 grid	205	65	60 pla	60 pla	23
18	0,06	8	30 honeycomb	210	70	60 pla	60 pla	26
19	0,06	5	80 grid	215	75	60 pla	60 pla	33
20	0,06	10	50 honeycomb	220	80	60 pla	60 pla	29
21	0,1	1	40 grid	220	60	120 abs	120 abs	16
22	0,1	2	30 honeycomb	225	65	120 abs	120 abs	12
23	0,1	1	50 grid	230	70	120 abs	120 abs	10
24	0,1	9	80 honeycomb	240	75	120 abs	120 abs	19
25	0,1	2	60 grid	250	80	120 abs	120 abs	8
26	0,1	1	50 honeycomb	200	60	120 pla	120 pla	11
27	0,1	4	40 grid	205	65	120 pla	120 pla	12
28	0,1	3	50 honeycomb	210	70	120 pla	120 pla	18
29	0,1	4	90 grid	215	75	120 pla	120 pla	34
30	0,15	1	30 honeycomb	220	80	120 pla	120 pla	14
31	0,15	4	50 grid	220	60	60 abs	60 abs	27
32	0,15	7	10 honeycomb	225	65	60 abs	60 abs	19
33	0,15	6	50 grid	230	70	60 abs	60 abs	18
34	0,15	1	50 honeycomb	240	75	60 abs	60 abs	9
35	0,15	7	80 grid	250	80	60 abs	60 abs	13
36	0,15	3	80 honeycomb	200	60	60 pla	60 pla	33
37	0,15	4	50 grid	205	65	60 pla	60 pla	24
38	0,15	10	30 honeycomb	210	70	60 pla	60 pla	26
39	0,15	6	40 grid	215	75	60 pla	60 pla	22
40	0,15	1	10 honeycomb	220	80	60 pla	60 pla	4
41	0,2	4	80 grid	220	60	40 abs	40 abs	35
42	0,2	9	90 honeycomb	225	65	40 abs	40 abs	34
43	0,2	7	30 grid	230	70	40 abs	40 abs	28
44	0,2	6	90 honeycomb	240	75	40 abs	40 abs	28
45	0,2	3	80 grid	250	80	40 abs	40 abs	21
46	0,2	5	60 honeycomb	200	60	40 pla	40 pla	28
47	0,2	4	20 grid	205	65	40 pla	40 pla	14
48	0,2	5	60 honeycomb	210	70	40 pla	40 pla	30
49	0,2	7	40 grid	215	75	40 pla	40 pla	29
50	0,2	3	60 honeycomb	220	80	40 pla	40 pla	27

## APÊNDICE C - BASE DE DADOS DE IMPRESSÃO 3D NORMALIZADA

	Altura da Camada [mm]	Espessura da Parede [mm]	Densidade de Preenchimento [%]	Padrão de Preenchimento	Temperatura do bico [°C]	Temperatura da mesa [°C]	Velocidade de Impressão [mm/s]	Materiais	Tensão última [Mpa]
1	0	0,777777778	1	grid	0,4	0	0	abs	18
2	0	0,666666667	1	honeycomb	0,5	0,25	0	abs	16
3	0	0	0,875	grid	0,6	0,5	0	abs	8
4	0	0,333333333	0,75	honeycomb	0,8	0,75	0	abs	10
5	0	0,555555556	1	grid	1	1	0	abs	5
6	0	0	0,375	honeycomb	0	0	0	pla	24
7	0	0,444444444	0	grid	0,1	0,25	0	pla	12
8	0	0	1	honeycomb	0,2	0,5	0	pla	14
9	0	0,888888889	0,75	grid	0,3	0,75	0	pla	27
10	0	0,777777778	0,375	honeycomb	0,4	1	0	pla	25
11	0,222222222	0,555555556	0,875	grid	0,4	0	0	abs	37
12	0,222222222	0,111111111	0,125	honeycomb	0,5	0,25	0	abs	12
13	0,222222222	1	0,5	grid	0,6	0,5	0,5	abs	16
14	0,222222222	0,555555556	0	honeycomb	0,8	0,75	0,25	abs	9
15	0,222222222	0,222222222	0,5	grid	1	1	0,25	abs	10
16	0,222222222	1	1	honeycomb	0	0	0	abs	27
17	0,222222222	0,222222222	0,375	grid	0,1	0,25	0,25	pla	23
18	0,222222222	0,777777778	0,25	honeycomb	0,2	0,5	0,25	pla	26
19	0,222222222	0,444444444	0,875	grid	0,3	0,75	0,25	pla	33
20	0,222222222	1	0,5	honeycomb	0,4	1	0,25	pla	29
21	0,444444444	0	0,375	grid	0,4	0	0	abs	16
22	0,444444444	0,111111111	0,25	honeycomb	0,5	0,25	0,25	abs	12
23	0,444444444	0	0,5	grid	0,6	0,5	0,5	abs	10
24	0,444444444	0,888888889	0,875	honeycomb	0,8	0,75	0,75	abs	19
25	0,444444444	0,111111111	0,625	grid	1	1	1	abs	8
26	0,444444444	0	0,5	honeycomb	0	0	0	abs	11
27	0,444444444	0,333333333	0,375	grid	0,1	0,25	0,25	abs	12
28	0,444444444	0,222222222	0,5	honeycomb	0,2	0,5	0,25	abs	18
29	0,444444444	0,333333333	1	grid	0,3	0,75	0,75	abs	34
30	0,444444444	0	0,25	honeycomb	0,4	1	1	abs	14
31	0,722222222	0,333333333	0,5	grid	0,4	0	0	abs	27
32	0,722222222	0,666666667	0	honeycomb	0,5	0,25	0,25	abs	19
33	0,722222222	0,555555556	0,5	grid	0,6	0,5	0,5	abs	18
34	0,722222222	0	0,5	honeycomb	0,8	0,75	0,75	abs	9
35	0,722222222	0,666666667	0,875	grid	1	1	1	abs	13
36	0,722222222	0,222222222	0,875	honeycomb	0	0	0	abs	33
37	0,722222222	0,333333333	0,5	grid	0,1	0,25	0,25	abs	24
38	0,722222222	1	0,25	honeycomb	0,2	0,5	0,25	abs	26
39	0,722222222	0,555555556	0,375	grid	0,3	0,75	0,75	abs	22
40	0,722222222	0	0	honeycomb	0,4	1	1	abs	4
41	1	0,333333333	0,875	grid	0,4	0	0	abs	35
42	1	0,888888889	1	honeycomb	0,5	0,25	0,25	abs	34
43	1	0,666666667	0,25	grid	0,6	0,5	0,5	abs	28
44	1	0,555555556	1	honeycomb	0,8	0,75	0,75	abs	28
45	1	0,222222222	0,875	grid	1	1	1	abs	21
46	1	0,444444444	0,625	honeycomb	0	0	0	abs	28
47	1	0,333333333	0,125	grid	0,1	0,25	0,25	abs	14
48	1	0,444444444	0,625	honeycomb	0,2	0,5	0,5	abs	30
49	1	0,666666667	0,375	grid	0,3	0,75	0,75	abs	29
50	1	0,222222222	0,625	honeycomb	0,4	1	1	abs	27

**APÊNDICE D - GRÁFICOS TENSÃO x DEFORMAÇÃO**