



Universidade Federal da Bahia
Instituto de Computação / Escola Politécnica

Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica

**CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS DE IMPRESSÃO 3D
E A RESISTÊNCIA MECÂNICA ANISOTRÓPICA DE PEÇAS
IMPRESSAS EM PLA**

ALEXANDRE ARARIPE CAVALCANTE

TESE DE DOUTORADO

Salvador

20 de setembro de 2022

ALEXANDRE ARARIPE CAVALCANTE

**CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS DE IMPRESSÃO 3D
E A RESISTÊNCIA MECÂNICA ANISOTRÓPICA DE PEÇAS
IMPRESSAS EM PLA**

Esta Tese de Doutorado foi apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica da Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe

Salvador

20 de setembro de 2022

C377 Cavalcante, Alexandre Araripe.
Correlação entre parâmetros de impressão 3D e a resistência
mecânica anisotrópica de peças impressas em PLA/ Alexandre
Araripe Cavalcante. – Salvador, 2022.
175 f.: il. color.

Orientador: Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe.

Tese (doutorado) – Universidade Federal da Bahia. Escola
Politécnica, 2022.

1. Manufatura aditiva. 2. Resistência mecânica. 3. Impressão 3D.
4. Modelo matemático. I. Pepe, Iuri Muniz. II. Universidade Federal
da Bahia. III. Título.

CDD: 620.112

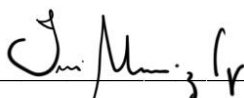
TERMO DE APROVAÇÃO

Alexandre Araripe Cavalcante

Correlação entre parâmetros de impressão 3D e a resistência mecânica anisotrópica de peças impressas em PLA. .

Esta Tese de Doutorado foi julgada adequada a obtenção do título de Doutor em Mecatrônica e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica da Universidade Federal da Bahia.

Salvador, 20 de setembro de 2022



Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe (Orientador - PPGM/UFBA)



Prof. Dr. Antonio Ferreira (UFBA)



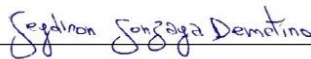
Prof. Dr. Herman Augusto Lepikson



Prof. Dr. Carlos Arthur Mattos Teixeira Cavalcante (UFBA)



Prof. Dr. José Garcia Vivas Miranda (UFBA)



Prof. Dr. Geydison Gonzaga Demetino (UFRB)

Para minha esposa Simone,
sem a qual os últimos 40 anos não seriam tão felizes,
a maior incentivadora desse trabalho.
Sua paciência e encorajamento foram fundamentais.

AGRADECIMENTOS

Ao Professo Dr. Iuri Muniz Pepe pela Orientação, ensinamentos, compreensão, confiança e incentivo durante todo o trabalho.

Ao Amigo Professor Newton Barros Oliveira pela inestimável assessoria e discussões sobre este trabalho.

Ao corpo docente do PPGM, pelas excelentes aulas.

Ao Instituto de Física da UFBA pela infraestrutura que permitiu a realização deste trabalho em um ambiente acolhedor, confortável e tranquilo, especialmente ao seu Diretor Professor Dr. Ricardo Miranda e ao Vice-Diretor Professor Dr. Alexandre Gadelha.

Ao Departamento de Física da Terra e do Meio Ambiente – DFTMA do Instituto de Física da UFBA pelo apoio e incentivo.

Aos amigos e colegas do LAPO-Laboratório de Propriedades Óticas do Instituto de Física, pelo apoio e incentivo.

Ao amigo e colega José Alejandro Moreno Alfonzo, pela valiosa ajuda com a formatação deste trabalho e pela execução dos desenhos da máquina de teste em Solidworks.

A minha esposa e filhos, objetivos da minha vida, sempre incentivadores.

A meus irmãos, minha maior herança.

"A ciência é muito mais que um corpo de conhecimentos. É uma maneira de pensar."

Carl Sagan

A Fabricação por Filamento Fundido (FFF – Fused Filament Fabrication), mais conhecida por FDM[®] (Fused Deposition Modeling) é um processo de manufatura aditiva (AM) pelo qual um objeto físico pode ser criado, a partir de um modelo em 3D gerado em computador, através da deposição camada a camada de filamentos plásticos semiderretidos. Por ser um processo eficiente, durável e de baixo custo, permitindo a prototipagem rápida de modelos e reduzindo o tempo e o custo de projeto, vem sendo largamente usada na indústria para protótipos funcionais e baixos volumes de produção, sendo que, desde a queda das patentes originais dos processos de FDM, um grande número de impressoras 3D surgiu no mercado de consumo, tornando essa tecnologia uma tecnologia de fácil acesso e cada vez mais popular. Entretanto, as peças produzidas pelo processo de FDM possuem características diferentes das peças produzidas por métodos tradicionais como a injeção de plástico, especialmente no que tange às propriedades mecânicas relacionadas às tensões de tração, compressão, torção e cisalhamento, devido à natureza anisotrópica do processo de deposição. Por isso, torna-se importante identificar e caracterizar os parâmetros do processo que têm maior influência nas propriedades mecânicas das peças fabricadas por FDM. Muitos trabalhos têm sido realizados no sentido de determinar a influência dos parâmetros do processo de FDM sobre as características mecânicas de peças produzidas por essa tecnologia, mas a grande maioria deles analisam a resistência longitudinal causada pelo sentido e orientação de deposição dos fios semiderretidos. Os poucos trabalhos que abordam a anisotropia transversal geralmente o fazem simulando essa anisotropia em espécimes impressos na horizontal e contemplam testes usando ABS (*Acrylonitrile-butadiene-styrene*), um plástico de uso muito comum na indústria. Nos últimos dez anos um novo plástico, o PLA (*Polyactic Acid*), começou a se popularizar como material usado nas impressoras 3D, especialmente as impressoras de uso não industrial, por ser bio-degradável e possuir outras características que o tornam mais popular. Este trabalho estudou as relações entre os parâmetros de deposição (número de perímetros, percentual de preenchimento, preenchimento, altura da camada e temperatura de extrusão) e a resistência mecânica para cargas de tração no sentido transversal de impressão das peças impressas, determinando a contribuição desses parâmetros e propondo um modelo matemático para prever a resistência baseada na geometria de uma peça, permitindo a inclusão de parâmetros de impressão na modelagem da mesma. Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina de teste construída especialmente para essa pesquisa. Para determinar os ensaios experimentais usamos a metodologia DOE fatorial (*Design of Experiment*) para minimizar a quantidade de experimentos. Usando a análise de variância (ANOVA) e o método Taguchi de análise dos resultados, identificamos a Área de Contato entre as espiras como o parâmetro mais relevante na resistência à tração no sentido transversal de impressão, com uma relevância de mais de 95% sobre os outros parâmetros estudados. A partir do levantamento das propriedades relevantes, novos ensaios foram realizados para determinar a solução de compromisso entre esses parâmetros e a resistência mecânica de peças fabricadas por FDM em PLA, sugerindo uma metodologia para reduzir a fragilidade das peças devido à anisotropia transversal.

Palavras-chave: Modelo matemático, resistência mecânica, impressão 3D, PLA

ABSTRACT

Fused Filament Fabrication (FFF), better known as FDM[®] (Fused Deposition Modeling) is an additive manufacturing process (AM) by which a physical object can be created from a 3D model generated in the computer, through layer-by-layer deposition of half-melted plastic filaments. Once it is an efficient, durable and low-cost process, allowing the rapid prototyping of models and reducing the cost and design time ratio, it has been widely used in the industry for functional prototypes and low production volumes, since original patent break for FDM processes a large number of 3D printers have emerged in the consumer market, making this technology affordable and popular. However, parts produced by the FDM process have different characteristics compared to parts produced by traditional methods, such as plastic injection, especially with regard to mechanical properties related to stresses (tensile, compression, torsion and shear), due to the anisotropic nature of the process deposition. Because of this, it is important to identify and characterize the process parameters that have the greatest influence on the mechanical properties of parts manufactured using FDM. Many works have been carried out in order to determine the influence between the FDM process parameters and the mechanical characteristics of parts produced by this technology, but the vast majority of them analyze the longitudinal resistance caused by the direction and orientation of deposition of half-melted wires. The few works that address transversal anisotropy generally do so by simulating this anisotropy with specimens printed longitudinally and contemplate tests using ABS, a plastic very commonly used by the industry. In the last decade, a new plastic, PLA, has started to expand as a material used in 3D printers, especially printers for non-industrial use, as it is biodegradable and has other characteristics that make it more popular. This work try to figure out the relationships between the deposition properties (such as number of perimeters, percentual of filling, layer height and extrusion temperature) and the mechanical strength for tensile loads in the transversal direction of printed pieces, determining the contribution of these parameters and proposes a mathematical model to predict the resistance based on the geometry of the part, allowing the inclusion of printing parameters in its modeling. Tensile tests were carried out on a testing machine built especially for this research. To determine the experimental tests we use the factorial DOE methodology (Design of Experiment) to minimize the amount of experiments. Using analysis of variance (ANOVA) and the Taguchi method of analysis, we identified the Contact Area between the layers as the most relevant parameter in the tensile strength in the transversal direction of the printed layers, with a relevance of more than 95% over the other parameters studied. From the survey of relevant properties, new tests were carried out to determine the compromise solution between these parameters and the mechanical resistance of parts manufactured by FDM in PLA, suggesting a methodology to reduce the fragility of the parts due to transversal anisotropy.

Keywords: Mathematical model, mechanical strength, 3D printing, PLA.

Capítulo 1. INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTO GERAL	1
1.2 JUSTIFICATIVA	5
1.3 OBJETIVOS	5
1.4 CONTRIBUIÇÕES.....	6
1.5 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS	7
Capítulo 2. REVISÃO DA LITERATURA	9
2.1 INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS NA RESISTÊNCIA DE PEÇAS IMPRESSAS EM FDM.....	9
2.2 O DOE- DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS.....	14
2.2.1 Modelos para o DOE	15
2.3 O ENSAIO DE TRAÇÃO	16
2.4 A GEOMETRIA DA AMOSTRA	17
2.4.1 Amostras <i>dog-bone</i> chato.....	18
2.4.2 Amostra cilíndrica	24
2.5 PADROES DE PREENCHIMENTO.....	26
2.6 PARÂMETROS RELEVANTES PARA A ANÁLISE DA RESISTÊNCIA ANISOTRÓPICA NO FDM.	27
Capítulo 3. MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1 MÁQUINA PARA OS ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	29
3.1.1 Especificações e requisitos da máquina de teste de tração.	29
3.1.1.1 Requisitos da pesquisa para a máquina de ensaios de tensão	30
3.1.1.2 Especificações ASTM para uma máquina de ensaio de tensão.....	30
3.1.2 Construção da máquina para os ensaios de tração	31
3.1.2.1 Mecânica.....	31
3.1.2.2 Eletrônica	34
3.1.2.3 O software de gerenciamento e aquisição de dados	36
3.1.3 Garras	40
3.1.4 O Extensômetro.....	47
3.1.5 Validação da Máquina de Testes.....	50
3.2 AS IMPRESSORAS 3D E O PROGRAMA DE FATIAMENTO.....	51
3.3 EM BUSCA DA MELHOR GEOMETRIA PARA AS AMOSTRAS	52

3.4 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS A SEREM ANALISADOS NA PESQUISA.....	54
3.4.1 Aplicação do DOE para determinar a contribuição dos parâmetros	54
3.5 DETERMINAÇÃO DA ÁREA TOTAL DE CONTATO.....	55
3.5.1 A ligação entre as camadas.....	58
3.6 RELAÇÃO ENTRE PERÍMETRO E O PREENCHIMENTO	58
3.7 DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE A TENSÃO DE ROMPIMENTO E OS PARÂMETROS ANALISADOS	58
Capítulo 4. RESULTADOS.....	61
4.1 A DETERMINAÇÃO DA GEOMETRIA DAS AMOSTRAS	61
4.1.1 A amostra	64
4.2 DETERMINAÇÃO DA ÁREA TOTAL DE CONTATO.....	66
4.3 A LIGAÇÃO ENTRE AS CAMADAS.....	69
4.3.1 Determinação da Linha Plana.....	75
4.3.2 Determinação do comprimento do fio depositado.....	77
4.4 RELAÇÃO ENTRE PERÍMETRO E PREENCHIMENTO	80
4.5 RELEVÂNCIA DOS PARÂMETROS ANALISADOS.....	85
4.6 MECÂNICA DA RUTURA DA AMOSTRA.....	91
4.7 A RELAÇÃO ENTRE A TENSÃO E OS PARÂMETROS ANALISADOS	92
4.8 A RELAÇÃO ENTRE A TENSÃO E A ÁREA TOTAL PERCENTUAL.....	96
Capítulo 5. CONCLUSÕES.....	103
5.1 TRABALHOS FUTUROS.....	104
REFERÊNCIAS	107
APÊNDICES 113	
APÊNDICE I - Tabela com resultados dos ensaios realizados.....	115
APÊNDICE II – Parâmetros do Simplify3D para as amostras	117
APÊNDICE III – Firmware da Máquina de Teste.....	127
APÊNDICE IV - Planos da máquina de teste de tração	137
APÊNDICE V – Artigos publicados	169

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Modelo esquemático do processo de FDM. Um filamento plástico derretido é depositado sobre uma plataforma camada a camada para formar um objeto tridimensional. (https://doi.org/10.1109/ICEAA.2017.8065498).....	2
Figura 1.2: Exemplo de peças impressas na impressora 3D criada pelo autor.....	3
Figura 2.1: Geometria da amostra para teste de tração – ASTM D638	18
Figura 2.2: <i>Dog-bone</i> chato impresso deitado.....	19
Figura 2.3: Seção transversal do <i>dog-bone</i> impresso deitado simulando o acamamento do eixo z.	20
Figura 2.4: A impressão da primeira camada, mais “achatada”	20
Figura 2.5: A impressão da primeira camada, mais “achatada”.....	21
Figura 2.6: <i>Dog-bone</i> chato com preenchimento cruzado na impressão horizontal.	21
Figura 2.7: Alteração nos vértices causados por <i>jerk</i> e troca de direção do cabeçote de impressão.	22
Figura 2.8: Seção reta mostrando diferenças das áreas de preenchimento entre uma amostra ASTM D638 tipo <i>dog-bone</i> chato e cilíndrico (100% de preenchimento)	23
Figura 2.9: Seção reta mostrando diferenças das áreas de preenchimento entre uma amostra ASTM D638 tipo <i>dog-bone</i> chato e cilíndrico (50% de preenchimento)	23
Figura 2.10: Deposição vertical com a área de contato máxima e mínimo “air-gap” entre as camadas	24
Figura 2.11: Deposição inclinada, em forma de “escadaria”, reduz a área de contato entre as camadas.....	24
Figura 2.12: Exemplos de alguns padrões de preenchimento utilizados pelos softwares de fatiamento.	27
Figura 2.13: Distribuição relativa dos parâmetros FDM investigado na maioria das publicações.....	28

Figura 3.1: A máquina de teste pronta para um ensaio com um espécime e o extensômetro instalado.	32
Figura 3.2: O mecanismo do atuador. Um motor com redução traciona o eixo acoplado à garra inferior.	33
Figura 3.3: Parte inferior da máquina contendo atuador, e eletrônica.....	34
Figura 3.4: Painel posterior com conector de força e conector USB.	34
Figura 3.5: Diagrama da Eletrônica da Máquina de Tração.....	35
Figura 3.6: Montagem da eletrônica.	36
Figura 3.7: A tela principal do programa de controle e aquisição da máquina de teste.....	37
Figura 3.8: Um gráfico Tensão-Elongação (Stress-Strain).....	38
Figura 3.9: Gráfico de Tração-Elongação máquina para os espécimes de uma amostra.....	39
Figura 3.10: Exemplo de relatório emitido pelo programa.	40
Figura 3.11: Garras mandíbulas em cunha.	41
Figura 3.12: Garras com mandíbulas paralelas tipo morsa.....	42
Figura 3.13: Diversos espécimes impressos e testados para as amostras de geometria cilíndrica.	44
Figura 3.14: Algumas das garras construídas para acomodar uma amostra cilíndrica.....	45
Figura 3.15: Garra bipartida para a amostra DBCC usada na pesquisa.	46
Figura 3.16: Garra bipartida para a amostra DBCC usada na pesquisa.	46
Figura 3.17: Extensômetro com “strain gage” e lâminas.....	47
Figura 3.18: Aparelho para a calibração do extensômetro.	48
Figura 3.19: Extensômetro mais sensível para os testes com as amostras desta pesquisa.	49
Figura 3.20: Calibrador para o extensômetro mais sensível.	49
Figura 3.21: Curvas de tensão-deformação (<i>stress-strain</i>) comparando espécimes idênticos em duas máquinas.	50
Figura 3.22: Impressora 3D comercial Makerbot Replicator 2	52

Figura 3.23: Impressora 3D projetada e construída pelo Autor.....	52
Figura 3.24: Variáveis do processo	54
Figura 3.25: Foto ampliada mostrando como se dá o acamamento no preenchimento cruzado.....	56
Figura 3.26: Foto de um corte transversal da região de <i>gauge</i> de um espécime, mostrando o acamamento linear do preenchimento com o mesmo ângulo em todas as camadas.....	57
Figura 4.1: a) geometria parcial da seção da amostra cilíndrica com transição suave entre as zonas de gripe e <i>gauge</i> . B) Imagem parcial da amostra gerada pela rotação da geometria em a)	61
Figura 4.2: Grip envolvendo a região de transição de um espécime cilíndrico convencional.	62
Figura 4.3: Geometria do espécime cilíndrico projetado com "split-collar" (topo do espécime).	63
Figura 4.4: Geometria do espécime cilíndrico projetado com "split-collar" (base do espécime).	63
Figura 4.5: Geometria das partes superior e inferior da amostra projetada para essa pesquisa.	64
Figura 4.6: Imagem renderizada da amostra cilíndrica utilizada nesta pesquisa, uma análise de tensão e um espécime impresso	65
Figura 4.7: Processos do Simplify3D para o fatiamento da amostra.....	66
Figura 4.8: Os diversos percentuais e preenchimento linear usados nesta pesquisa.	67
Figura 4.9: Os percentuais reais para o preenchimento linear usados nesta pesquisa.	68
Figura 4.10: Percentuais de preenchimento reais nos espécimes impressos.	68
Figura 4.11: Geometria da extrusão em uma impressora 3D FFF.....	70
Figura 4.12: Corte indicando a área de contato entre as camadas, onde uma dimensão é a Linha Plana.....	71
Figura 4.13: (a) $EW = 0,40\text{mm}$, $H = 0,40\text{mm}$; (b) $EW = 0,48\text{mm}$, $H = 0,30\text{mm}$; (c) $LP =$ diâmetro do bico; (d) $LP >$ diâmetro do bico.....	73

Figura 4.14: Detalhe de um corte num espécime para a medida da Linha Plana. ...	75
Figura 4.15: Foto ampliada mostrando a determinação da Linha Plana no ImageJ.	76
Figura 4.16: Imagens ampliadas de diversos cortes do acamamento vertical em espécimes usadas no ImageJ para a determinação da Linha Plana.	76
Figura 4.17: Tela do programa para extrair do arquivo gcode o comprimento dos fios depositados.	79
Figura 4.18: Saída do programa Calcula Comprimentos	79
Figura 4.19: Razão comprimento do Infill / comprimento do perímetro para 1 perímetro	82
Figura 4.20: Razão comprimento do Infill / comprimento do perímetro para 2 perímetros.....	83
Figura 4.21: Razão comprimento do Infill / comprimento do perímetro para 3 perímetros.....	83
Figura 4.22: Razão entre comprimento do <i>Infill</i> e comprimento do perímetro para 2 perímetros.....	84
Figura 4.23: Resultado do ANOVA no MINITAB para a matriz L9.	86
Figura 4.24: Contribuição dos parâmetros de processo para resistência a tração. ...	87
Figura 4.25: Razão SN para a Resistência a Tração (fonte: MINITAB).	88
Figura 4.26: Interação do fator Temperatura na relação entre a Área Total e resistência a tração. (fonte: MINITAB)	89
Figura 4.27: Interação do fator Altura da Camada na relação entre a Área Total e resistência a tração. (fonte: MINITAB.....	90
Figura 4.28: Equação de regressão obtida na ANOVA. (fonte: MINITAB)	90
Figura 4.29: Análise de tensões na deposição entre camadas.	91
Figura 4.30: Resíduos da regressão da função Tensão.	94
Figura 4.31: Modelo linear para a Tensão	95
Figura 4.32: Tensão como função da Área Total % e da Altura da camada.	96
Figura 4.33: Tensão X Área Total para as amostras ensaiadas.	97
Figura 4.34: Corte longitudinal de um espécime com 100% de preenchimento.	98

Figura 4.35: Tensão X Área Total Percentual para as amostras ensaiadas	98
Figura 4.36: Ajuste Linear para a relação Tensão X Área Total Percentual.....	99
Figura 4.37: Regressão polinomial para a Tensão X Área Total %.....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Valores de ruptura para os 4 espécimes testados.....	51
Tabela 3.2: Níveis dos parâmetros selecionados.....	55
Tabela 3.3: Parâmetros e seus níveis.....	57
Tabela 4.1: Valores calculados de Linha Plana (em mm) para diferentes valores de EW (largura da extrusão) e H (altura da camada).	73
Tabela 4.2: Valores medidos de Linha Plana (em mm) para diferentes valores de EW (largura da extrusão) e H (altura da camada).	77
Tabela 4.3: Comprimento L para as amostras utilizadas (1 Perímetro – Camada 0,3mm e Temperatura 220°C).....	80
Tabela 4.4: Plano experimental para uma matriz ortogonal L9	85
Tabela 4.5: Resultados experimentais para o arranjo ortogonal L9.	85
Tabela 4.6: Elongação média medida pelo extensômetro nos ensaios realizados. ...	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Acrylonitrile-butadiene-styrene
AM	Manufatura Aditiva
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	American Society for Testing and Materials
CNC	Controle Numérico por Computador
DOE	Design of Experiment
EW	Extrusion Width
FDM	Fused Deposition Modeling
FEM	Finite Element Method
FFF	Fused Filament Fabrication
Gcode	Código G
LP	Linha Plana
LVDT	Transdutor de Deslocamento Variável Linear
MISO	Multiple Input Single Output
NET C#	Linguagem de Programação Orientada a Objetos da Microsoft
PLA	Polyatic Acid
PWM	Pulse Width Modulator
RepRap	Impressora 3D replicável Open Source
SEM	Scanning Electron Microscope
SN	Relação Sinal/Ruído
STL	Standard Tessellation Language
UTM	Universal Testing Machine
XML	eXtensible Markup Language



INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados a justificativa, objetivos, contribuições e a organização deste trabalho.

1.1 CONTEXTO GERAL

A Manufatura Aditiva (AM – *Additive Manufacturing*) é uma tecnologia que promete revolucionar a indústria de fabricação de objetos e tem atraído grande atenção nos últimos anos devido à sua aplicação em várias indústrias (ZHANG, 2015).

Essa tecnologia consiste na junção (adição) de materiais para criar objetos camada a camada. Entretanto, objetos fabricados por AM possuem comportamentos mecânicos diferentes daqueles fabricados por tecnologias tradicionais, tais como injeção e fundição.

Atualmente, as disciplinas de Resistência dos Materiais, nos currículos de Engenharia, permitem aos estudantes obter conhecimento nos princípios fundamentais e desenvolver habilidades para resolver problemas relacionados à análise de tensões e para projetar estruturas e elementos de máquinas usando técnicas convencionais de produção de peças e como as indústrias estão cada vez mais voltadas para a prototipação e produção usando AM, torna-se importante conhecer o desempenho mecânico das partes fabricadas por essa tecnologia e desenvolver metodologias para o estudos das propriedades mecânicas da peças produzidas por AM.

Muitos softwares hoje no mercado fazem análises de tensão (FEM – *Finite Element Method*) a partir da modelagem em três dimensões dos objetos. Entretanto essas análises têm sido voltadas para as tecnologias convencionais de produção não incluindo algoritmos capazes

de lidar com os problemas decorrentes das características peculiares da produção por processos de AM.

Entre estes problemas, o mais acentuado é o problema do comportamento anisotrópico devido ao processo de deposição camada a camada. O processo de modelagem por deposição fundida (FDM - *Fused Deposition Modeling*), é uma das tecnologias de AM mais populares atualmente para a prototipagem de modelos físicos.

No processo de FDM, um filamento de plástico parcialmente derretido é extrudado por um bico fino e depositado em uma superfície plana para formar um objeto tridimensional (**Figura 1.1**).

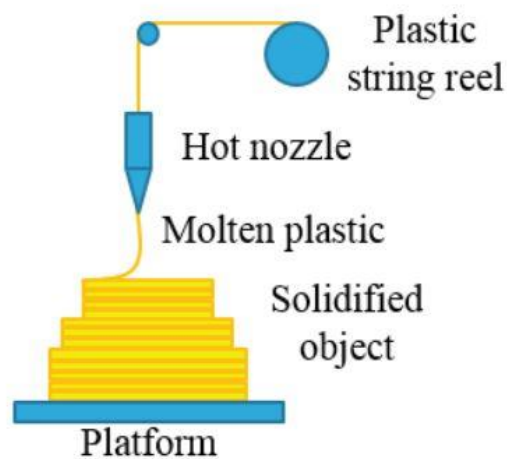


Figura 1.1 Modelo esquemático do processo de FDM. Um filamento plástico derretido é depositado sobre uma plataforma camada a camada para formar um objeto tridimensional. (<https://doi.org/10.1109/ICEAA.2017.8065498>)

O movimento do extrusor é controlado por um software a partir de um modelo computacional 3D, depositando camada a camada até formar o objeto em três dimensões (**Figura 1.2**).



Figura 1.2: Exemplo de peças impressas na impressora 3D criada pelo autor.

A deposição das camadas derretidas sobre as camadas anteriores forma um sólido com diferentes propriedades mecânicas na direção da deposição das camadas. Essa anisotropia normalmente não presente nos materiais criados pelas tecnologias tradicionais (como por exemplo, injeção em moldes) altera significativamente as propriedades mecânicas do objeto final, principalmente aquelas relacionadas à distensão e ao cisalhamento.

Atualmente, uma solução parcial para os problemas decorrentes da anisotropia intrínseca ao FDM é obtida no próprio projeto da peça e na escolha da sua orientação na impressão 3D, já que sua resistência pode localmente controlada depositando-se o filamento em diferentes orientações e densidades.

Assim, atualmente, a estratégia mais eficaz para o problema de resistência causado pela anisotropia, considerando apenas impressoras com 3 graus de liberdade, tem sido o aumento da densidade em regiões críticas do modelo.

Entretanto, na maioria das vezes, esses cuidados não resolve completamente o problema, especialmente o da anisotropia vertical e aumentar indiscriminadamente a densidade

de impressão gera um aumento no uso do material e sobretudo no tempo de impressão (ZHANG, 2015).

A impressão por FDM, de maneira geral é lenta. Assim, costuma-se controlar o percentual de preenchimento de partes sólidas de forma a reduzir o tempo de impressão. Com isso produz-se um objeto aparentemente sólido, mas oco, com o interior preenchido por uma estrutura quadriculada ou em favo de mel de abelha, por exemplo.

Após o filamento semiderretido ser depositado na plataforma de trabalho ou em outra camada prévia ele começa a esfriar e funde-se difusamente aos materiais previamente depositados na vizinhança. A ligação entre os fios extrudados individualmente em uma mesma camada e de camadas vizinhas é função da energia térmica do material semiderretido.

Atualmente o processo de impressão 3D camada a camada utiliza vários tipos de materiais plásticos como o ABS – *Acrylonitrile-butadiene-styrene*, PLA – *Polyactic Acid* (um plástico biodegradável feito de cana-de-açúcar), Nylon, elastômeros e outros materiais não plásticos como ceras de fundição, cerâmicas, concretos, açúcares etc.

As propriedades mecânicas de um plástico estrutural comum, como o ABS e o PLA, são bem conhecidas, mas suas propriedades gerais não podem ser utilizadas para o projeto de peças pelo processo de FDM devido principalmente à anisotropia mecânica desse processo criada pelo sistema de formação por deposição em fios e camadas, o que reduz em muito a resistência da peça resultante, especialmente no sentido de deposição das camadas (LEE; HUANG, 2013) (IVANOVA; WILLIAMS; CAMPBELL, 2013).

Conquanto muitos autores, a exemplo de AHN et al., 2002 e outros tenham estudado a influência e relações entre os parâmetros envolvidos na impressão por FDM e as propriedades relacionadas à resistência mecânica como tração, compressão, flexão, cisalhamento, estes estudos na sua grande maioria envolvem apenas a resistência relacionada com o sentido de deposição horizontal dos fios. Além disso, contemplam testes realizados principalmente com ABS. Neste trabalho procuraremos utilizar o PLA por ser um plástico biodegradável que vem sendo largamente utilizado nos últimos anos com grande aceitação.

Muito dos esforços das pesquisas existentes hoje em FDM são atualmente na área de desenvolvimento de novos materiais (compósitos, mistura de polímeros, adição de fibras, cores, texturas, plásticos metalizados e outros) ou em novas tecnologias para a deposição destes materiais.

Entretanto, apesar de estudos terem sido realizados por diversos pesquisadores, relacionando as diversas propriedades de processo da fabricação por FDM e as características mecânica das peças resultantes, ainda não foi sugerido uma metodologia segura para determinar e reduzir a fragilidade das peças produzidas, em especial em relação ao sentido vertical (das camadas) de deposição. Normalmente os trabalhos efetuados neste campo estudam apenas a resistência no sentido de deposição do filamento extrudado.

Além disso, são poucos os estudos caracterizando as propriedades mecânicas de peças produzidas por FDM utilizando PLA, um material introduzido no mercado de AM há poucos anos e que vem ganhando a preferência especialmente nas impressoras de uso pessoal.

O PLA pertence à família dos poliésteres alifáticos e são considerados biodegradáveis e compostáveis, e é produzido a partir de fontes renováveis. O PLA possui um tempo de degradação que varia de seis meses a 2 anos no meio ambiente (GARLOTTA, 2002).

1.2 JUSTIFICATIVA

Três foram as principais justificativas da investigação para esse trabalho:

- A necessidade de se determinar quais os parâmetros relevantes para a resistência de peças impressas com PLA, no sentido transversal à impressão das camadas;
- A necessidade de se estabelecer uma relação de matemática entre os parâmetros relevantes do processo e a resistência devido a ligação entre as camadas de peças projetadas para serem produzidas pelo método de FDM com uso de PLA;
- A necessidade de desenvolver uma metodologia para a inclusão de parâmetros de fatiamento ainda na fase de projeto de peças a serem impressas em impressora 3D.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo desta pesquisa é desenvolver uma abordagem para a determinação da relação de compromisso entre parâmetros da impressão pelo processo de FDM usando PLA e a resistência mecânica anisotrópica das peças produzidas. Além disso, sugerir uma metodologia inédita e inovadora capaz de introduzir ainda na fase de projeto de peças, parâmetros que são intrínsecos ao método de impressão em impressora 3D e utilizados nas configurações dos softwares de fatiamento e preparo de arquivos para a impressão, de forma a resultar em produtos capazes de resistir às cargas projetadas.

Para a execução dessa pesquisa os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- Definir o melhor aporte inédito do trabalho através de um levantamento bibliográfico das pesquisas que são realizadas em paralelo;
- Identificar as razões pelas quais a geometria das amostras comumente utilizadas para estudar a anisotropia do processo FDM é falha e projetar uma geometria de amostra mais adequada ao estudo da anisotropia causada pela deposição camada a camada do método FDM, objeto deste estudo;
- Construir um equipamento mecatrônico para realizar os ensaios de tensão/deformação de amostras impressas em PLA, incluindo a eletrônica, firmware e software de aquisição de dados;
- Projetar uma garra especializada para prender os espécimes à máquina de teste de tração de forma a atender as especificações ASTM (American Society for Testing and Materials) para ensaios de tração;
- Projetar um extensômetro para medir a elongação durante os ensaios de tração, incluindo a eletrônica e firmware para aquisição de dados e equipamentos de calibração;
- Testar espécimes da geometria projetada com o intuito de refinar a geometria, verificar e garantir a adequação às normas ASTM e repetitividade nos ensaios;
- Definir os parâmetros para o DOI (Desenho de Experimentos) e o desenho de experimentos preliminares;
- Determinar a influência relativa dos parâmetros na resistência no sentido vertical da impressão 3D;
- Realizar ensaios adicionais com variação dos parâmetros analisados para determinar uma relação matemática entre esses parâmetros e a tensão de rompimento para peças impressas em PLA.

1.4 CONTRIBUIÇÕES

Este trabalho traz as seguintes contribuições principais.

- Modelos matemáticos para permitir o planejamento de peças impressas em FDM que serão submetidas a tração no sentido de deposição das camadas e o ajuste dos parâmetros relevantes nos softwares fatiadores;

- Análises das relações entre a quantidade de perímetros e percentual de preenchimento de peças impressas em 3D, fatores importantes na determinação da resistência a tração, tempo de impressão e gasto de material;
- Uma geometria mais adequada para as amostras a serem usadas em testes de tração;
- Uma metodologia mais adequada à análise da resistência no sentido da deposição das camadas em impressões 3D por FDM;
- Determinação da resistência máxima a tração para peças impressas em PLA;
- O projeto e construção de uma máquina para teste de tração;

1.5 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

Este trabalho de tese está organizado da seguinte forma:

- Capítulo 2 – Contém a revisão da literatura, incluindo trabalhos de outros autores sobre o assunto tratado e as bases teóricas usadas na pesquisa de forma a compreender os objetivos propostos e as contribuições alcançadas;
- Capítulo 3 – Descreve os materiais e métodos de análise e procedimentos experimentais aplicados para obtenção e análise dos dados para alcançar os objetivos propostos;
- Capítulo 4 - Apresenta em detalhe os resultados e análises obtidos em cada etapa do desenvolvimento experimental;
- Capítulo 5 – Contém a conclusão e sugestão de trabalhos futuros;

REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo introduziremos os estudos sobre o tema, realizado por outros autores, e os conceitos teóricos utilizados na pesquisa.

2.1 INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS NA RESISTÊNCIA DE PEÇAS IMPRESSAS EM FDM

Existem muitas formas para abordar a caracterização mecânica de peças produzidas pelo processo de FDM. Pesquisadores mostraram que uma forma de definir as propriedades dos diversos materiais usados nesta tecnologia é através dos conceitos da mecânica de materiais tradicional que expressa o estresse macroscópico médio e o os estados de tensão em termos de estados de tensão-deformação usando técnicas de continuidade de deslocamento e condições de equilíbrio de forças (VILLALPANDO; EILIAT; URBANIC, 2014).

Em geral, as propriedades mecânicas estáticas relacionadas aos materiais usados em AM podem ser encontradas na literatura uma vez que muitos autores realizaram trabalhos envolvendo o estudo da resistência mecânica destes materiais, especialmente o ABS, no processo de FDM.

Modelos matemáticos preditivos de transferência e difusão de calor (YARDIMCI et al., 1996) em fios depositados no processo de FDM sugerem que o esfriamento do fio depositado possuem grande influência na qualidade da ligação entre as camadas e qualidade final da impressão. As propriedades mecânicas do ABS e PLA foram objeto de estudo de SWETHAM, MADHANA, *et al.*, 2017 enquanto WEEREN *et al.*, 1995, destacaram os defeitos, suas causas e origens em peças produzidas em FDM, relacionando-os ao hardware, software e limitações na estratégia de construção, através de caracterização da qualidade usando microscopia

eletrônica (SEM - *Scanning Electron Microscope*) e microscopia ótica. A relação entres diferentes estratégias de deposição e a resistência final das peças produzidas por FDM foram analisadas (KULKARNI; DUTTA, 1999) usando técnicas de laminação de compósitos obtendo resultados que sugerem o uso dessa técnica como um auxiliar na estratégia de voltada para a resistência das peças.

Em um estudo realizado por ALI; F. *et al.*, (2014), uma investigação paramétrica foi realizada para determinar a influência de vários fatores como altura da camada de deposição, diâmetro do filamento (*road*) depositado, ângulo de deposição, número de contornos, “*air gap*”, desvios nos parâmetros do fatiamento, ângulo de fatiamento e outros no processo de FDM, usando como método de delineamento de experimento (DOE – *Design of experiment*) o método Taguchi de análise. O foco foi na identificação de relações entre os parâmetros do processo de FDM selecionados e medidas de desempenho tais como tempo de execução da peça, consumo de material e qualidade de acabamento final da peça, além de testes de resistência mecânica.

Alguns autores como SOOD *at. al.* (2009 e 2012) investigaram experimentalmente a influência de parâmetros como altura de camada, orientação do objeto na impressão, “*air gap*”, ângulo e largura de varreduras (*raster*), na precisão dimensional de peças em ABS. A precisão dimensional foi determinada por eles pela variação percentual na largura, comprimento e espessura da peça impressa propondo um modelo não linear preditivo. Resultados mostram a importância da força de ligação fibra a fibra e do controle de distorção durante o processo de fabricação.

Para determinar o quanto as peças produzidas pelo processo de FDM são capazes de preservar suas integridades mecânicas quando submetidas a cargas ZIEMIAN *et al.*, (2012), analisaram quantitativamente o potencial do FDM como ferramenta plena de manufatura. Para isso estudou a dependência de propriedades mecânicas de peças criadas por FDM em função da orientação e varredura da impressão. Estudou o efeito da orientação das fibras em uma variedade de propriedades mecânicas de componentes fabricados em ABS. Ensaio como tensão, compressão, flexão, impacto e fadiga foram realizados e os resultados comparados com as propriedades de peças feitas por injeção.

Um modelo matemático preditivo para a otimização de parâmetros do processo de fabricação por FDM para obter a máxima resistência das peças produzidas em ABS foi obtido por ONWUBOLU e RAYEGANI, (2014.) Eles analisaram a influência de cinco parâmetros –

espessura da camada, orientação da peça, ângulo e comprimento de varredura e “*air gap*” na resistência de corpos de teste impressos usando DOE.

As propriedades mecânicas das partes fabricadas por FDM em ABS, segundo AHN *et al.*, (2002 e 2003), não são controladas somente pelo material no qual o filamento original é fabricado, mas sofrem influência significativa no processo de fabricação que produz peças com características anisotrópicas causadas principalmente pela fabricação em camadas. CHOCKALINGAM *et ali.* (2006) e JAIN, P. (2013) sugerem como uma forma de resolver essas limitações o desenvolvimento de novos materiais com características superiores aos materiais convencionais. Outra forma é o ajuste cuidadoso das variáveis de processo durante a fabricação.

Alguns autores consideram o estudo da anisotropia devido ao processo de deposição por camada do FDM (RODRÍGUEZ; THOMAS; RENAUD, 2006) investigando a força de tração e o módulo elástico de espécimes de teste em ABS feitos por FDM com mesoestruturas variadas em comparação com as propriedades de espécimes feitos de ABS extrudado.

Ainda segundo Onwubolu & Rayegani (2014), muito trabalho tem sido realizado em modelagem de peças FDM mais resistentes, mas pouco trabalho foi feito para desenvolver modelos mais resistentes em torno de parâmetros de processos relacionados aos métodos de deposição camada a camada.

Alguns experimentos mostram que a orientação do objeto durante a deposição das camadas tem uma grande influência na resistência final dos produtos manufaturados pela tecnologia de FDM (GÓRSKI *et al.*, 2015). Eles apresentaram resultados de testes de tensão, flexão e força de impacto realizado em amostras feitas com ABS com várias orientações de impressão usando FDM. Os resultados destes testes permitiram observar que com a alteração da orientação, não apenas os valores de resistência mudam, mas também o comportamento macroscópico do material sob influência de carga. A transição entre o ponto onde a resistência é aceitável e o ponto de fragilidade do material normalmente acontece em um determinado intervalo de orientação.

A relação entre o acabamento superficial e o tempo de fabricação da peça por FDM e o posicionamento da peça na mesa de impressão foi estudado por THRIMURTHULU, *et al.*, (2003). Outros autores também estudaram a orientação do objeto durante a deposição das camadas para diferentes objetivos, como precisão, tempo de impressão, estruturas de suporte etc. ALEXANDER *et al.* (1998) determinaram a orientação da impressão de peças

considerando a precisão e custo, tanto para a tecnologia de manufatura por estereolitografia (SL) quanto por FDM, permitindo estimar o custo para diferentes orientações de impressão.

Usando a teoria relacionada a materiais compostos e teoria de laminação clássica, AHN *et al.* (2003) calcularam as tensões em materiais sujeitos a carga. Para FDM usando ABS obteve valores entre 60% e 72% da resistência de peças feitas por injeção.

A resistência a tração de uma peça impressa em PLA, mesmo no sentido XY e com 100% de preenchimento, é 48% menor que uma peça fabricada por molde de injeção (LAY *et al.*, 2019). No sentido Z, a resistência a tração é em torno da metade da resistência em relação a resistência no plano XY.

A caracterização das propriedades anisotrópicas em um modelo FDM com ABS foram realizadas por AHN *et al.* (2002) usando DOE, a partir de testes realizados com espécimes obtidos em impressora industrial obtendo valores de resistência entre 65% e 72% em relação a peças injetadas de ABS P400 e forças de compressão entre 80% e 90%. Analisaram fatores como largura do fio depositado, *air gap*, temperatura de extrusão, orientação da varredura do fatiamento e cor do filamento (a presença de pigmentos altera as propriedades do material). Corpos de prova do tipo “*dog-bone*” ASTM D638 foram usados inicialmente sem sucesso (devido à fragilidades impostas pela geometria desses espécimes em relação ao processo de impressão) e posteriormente substituídos pelo ASTM D3039 com melhor resultados para a execução experimental. A partir daí, os autores sugerem várias regras a serem observadas no projeto de peças manufaturadas em ABS pelo processo impressão 3D.

- Projetar a peça tal que as cargas de tração estejam ao longo das fibras do material;
- Observar que a tensão se concentra em cantos arredondados devido à descontinuidade de transição que os fios de plástico depositados exibem;
- Usar um “*air gap*” negativo para aumentar tanto a rigidez quanto a resistência;
- Ter em mente que áreas tracionadas levam a falhas mais facilmente que as áreas submetidas à compressão;

Martinez *et al.* (2013) modelaram a geometria de corpos de teste do tipo “*dog-bone*” usando FEM (Finite Element Method). Seus resultados mostram que os níveis de falhas podem ser subestimados quando as peças são projetadas considerando resistência de materiais ortotrópicos.

Já LEE e HUANG (2013) realizaram uma série de experimentos submetendo os espécimes a cargas cíclicas de forma a estudar o efeito da fadiga nas peças produzidas por FDM. Entretanto neste trabalho não foram testadas situações envolvendo a anisotropia relativa à deposição em camadas durante a impressão.

GIANNATSIIS *et. al.* (2012) também investigaram a influência de vários parâmetros de processo nas propriedades mecânicas de peças produzidas por FDM, comparando uma impressora industrial “*low end*” e uma impressora do tipo “*open-source*” educacional baseada no projeto de baixo custo RepRap. Em ambas as impressoras foi usado ABS (embora de tipos diferentes). Um resultado interessante obtido por esses autores nos experimentos realizados é que a impressora de baixo custo produziu peças com qualidade mecânica de resistência comparável ao sistema industrial, uma vez que os parâmetros foram apropriadamente selecionados e ajustados.

Um modelo analítico envolvendo as propriedades mecânicas de resistência e tensão dos componentes fabricados por FDM foi desenvolvido por CROCCOLO *et al.* (2013), com o objetivo de prever essas propriedades baseado no número de contornos em volta da peça sendo fabricada e de outros parâmetros do processo. A eficiência do modelo teórico foi testada e verificada com um número de experimentos realizados com uma margem de erro de 4%.

Usando um algoritmo genético, VILLALPANDO *et al.* (2014) desenvolveram um modelo preditivo para o preenchimento das peças produzidas por FDM com estruturas interna de suporte em diferentes arranjos geométricos. Segundo eles, a incorporação de estruturas matriciais internas, com parâmetros configuráveis, baseadas em elementos primitivos podem balancear as propriedades mecânicas das peças, a quantidade de material consumido e o tempo de execução das peças.

Ainda, outros pesquisadores desenvolveram uma série de estudos experimentais utilizando delineamento de experimentos (DOE – Design of Experiments) de forma a caracterizar os diversos parâmetros envolvidos no processo de FDM e relacionando-os com testes de tensão, fadiga, compressão, dobragem etc., bem como com a qualidade das peças produzidas.

2.2 O DOE- DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS

Testar todas as variáveis, em todas as faixas de valores possíveis, com um grande número de repetições é normalmente inviável em termo de tempo e esforço para a análise dos resultados. Assim, deve-se buscar um método que estabeleça as condições adequadas para a realização dos experimentos e para a avaliação dos resultados obtidos. DOE – delineamento de experimentos – tem como objetivo a determinação do número ideal de experimentos que leve à obtenção de resultados com um dado grau de confiabilidade.

Em um experimento nós deliberadamente alteramos uma ou mais variáveis de processo (fatores) de forma a observar o efeito dessas alterações em outra ou outras variáveis de saída.

O modelo mais comum é a construção de uma matriz $m \times n$, onde m representa o número de variáveis e n o número de condições (valores) que se deseja atribuir a cada uma dessas variáveis. Para cada arranjo de variáveis e valores $A_{m,n}$ define-se a realização de um número de experimentos (geralmente 3 para identificar *outliers* ou 5+ para o controle estatístico de erros).

O DOE é um procedimento eficaz para planejar experimentos tal que os dados obtidos possam ser analisados de forma a resultar em conclusões válidas e objetivas. DOE inicia com a determinação dos objetivos do experimento e seleção dos fatores do processo (variáveis) para o estudo. (BUTTON, 2012).

Um delineamento experimental é o desenho detalhado do plano do experimento antes dele ser realizado. Um delineamento do experimento bem escolhido maximiza a quantidade de informações que pode ser obtida de um dado esforço experimental (NIST/SEMATECH, 2012).

Consiste em uma série sistemática de testes no qual variações propositas e definidas são feitas nos parâmetros de entrada com o objetivo de identificar variações significantes nos parâmetros de resposta do sistema (ANDERSON; WHITCOMB, 2007).

O delineamento de experimentos pode ser utilizado em pontos de grande importância para reduzir custo de projetos, agilizando o planejamento do processo, evitando alterações tardias, reduzindo o uso de material e complexidade de execução. O DOE são uma ferramenta poderosa para reduzir o custo da manufatura minimizando variáveis de processo, reduzindo o retrabalho, desperdícios e custo com inspeções de qualidade.

2.2.1 Modelos para o DOE

É comum iniciar-se com um modelo de processo do tipo caixa preta com várias variáveis (discretas ou contínuas) que podem ser controladas (variadas pelo experimentador) e uma ou mais variável de resposta (saída) (NIST/SEMATECH, 2012). A variável de saída é assumida do tipo contínua. Dados experimentais são então usados para obter-se uma aproximação empírica que relaciona as variáveis de entrada com as variáveis de saída.

Como exemplo, um modelo MISO (*multiple input single output*) linear com duas variáveis de entrada (X_1 e X_2) e uma variável de saída (Y) pode ser escrito como:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 + e$$

Onde e = erro experimental;

Y é a resposta do modelo à variação das variáveis de entrada;

X_1 e X_2 → variáveis de entrada do modelo

$X_1 X_2$ → termo de interação entre as variáveis de entrada $k(k-1)/2$

A análise dos resultados experimentais permitirá estimar os parâmetros “ b_n ” e os coeficientes de “ X ” são testados para verificar qual deles é significativamente diferente de 0.

Frequentemente existem muitos fatores possíveis, alguns dos quais podem ser críticos e outros podem ter pouca ou nenhuma influência na resposta do sistema. É desejável então reduzir o número de fatores a um conjunto relativamente pequeno de tal forma que a atenção possa ser focada no controle desses fatores com especificações apropriadas. Experimentos de triagem são um meio eficiente, com um número mínimo de testes, de determinar os fatores importantes do processo.

Um dos métodos de DOE mais utilizados é o método Taguchi de Delineamento de Experimento (DOE), que é uma metodologia reconhecida para o planejamento eficiente de experimentos, em especial os planejamentos fatoriais com matriz ortogonal que reduz significativamente a quantidade de experimentos a serem realizados tornando possível a análise da relação entre os parâmetros estudados sem que seja necessário realizar todas as variações entre as variáveis de processo e a variável de saída (MONTGOMERY, 2012).

O método Taguchi de Delineamento de Experimento faz uso de ANOVA (análise de variância) e gráficos de “*Main Effect*” e Contribuição de Fatores para determinar a significância dos fatores envolvidos no processo.

O método Taguchi usa uma equação logarítmica para a razão sinal/ruído (SN) para medir a sensibilidade da qualidade dos parâmetros sendo investigados em relação a fatores externos não controláveis. Neste trabalho usaremos a razão SN “Maior é melhor” que é calculada método Taguchi usando a equação:

$$SN = -10 \log_{10} \left(\sum_{i=1}^n (1/y_i^2)/n \right) \quad (1)$$

onde y = resposta para um determinado experimento e n = número de experimentos.

2.3 O ENSAIO DE TRAÇÃO

Com um espécime plástico sólido e isotrópico, o que teríamos em uma peça injetada em molde, três coisas ocorrem quando uma força é aplicada longitudinalmente (ALVIN J FLINT, 1998).

1. Deformação elástica imediata – proporcional à força aplicada;
2. Concorrentemente acontece uma deformação elástica lenta – proporcional ao tempo de aplicação da força;
3. Concorrentemente acontece uma deformação plástica (viscosa) – proporcional ao tempo e a força aplicada.

Os itens 1 e 2 são reversíveis. A magnitude das três deformações será diferente entre si e dependerão do tipo de polímero. No teste de tração normalmente observa-se uma curva tensão deformação inicialmente reta (fase da deformação elástica) seguida por uma curva que tem seu ponto máximo na tensão de ruptura do espécime. Esse comportamento é observado quando se testa espécimes impressos no plano XY com preenchimento em ângulo ou longitudinal.

O fato de observarmos apenas uma linha reta seguida do ponto de ruptura do espécime em um ensaio de curta duração significa apenas que a deformação elástica imediata é muito

grande comparada com as outras duas dependentes do tempo e os instrumentos não são suficientemente sensíveis para mostrar a deformação dependente do tempo. A área sobre a curva Tensão x Deformação é uma medida da energia necessária para quebrar o espécime também conhecida como módulo de tenacidade. Todas as propriedades mecânicas dos plásticos são dependentes devido ao comportamento viscoelástico do material, da temperatura e velocidade da distensão. É devido aos dois últimos fatores que a ASTM recomenda que a velocidade do teste de tração fique abaixo de 2 mm/min.

Quando tratamos de resistência de materiais, não tem valor prático a comparação direta das medidas de carga (tração) e de deformação uma vez que esses valores não levam em consideração a geometria dos espécimes. Por isso, nos ensaios de tração convertemos os valores de carga em valor de Tensão (Stress) (Equação (2)) e Deformação (Strain) (Equação (3)). Quando a tensão atinge o valor de máxima resistência do material (tensão de ruptura) ele rompe.

Durante o ensaio de tração, a força aplicada provoca uma contração transversal (elongação lateral) e um esticamento longitudinal (elongação longitudinal). A razão entre essas duas elongações determina o Módulo de Poisson do material que é uma medida do quanto um material irá deformar (contrair) na direção transversal (perpendicular a uma força axial). O valor do Módulo de Poisson para o PLA está em torno de 0,35.

$$\sigma = \frac{\text{Força}}{\text{Área}} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{L} \quad (3)$$

Onde Δl é a elongação medida pelo extensômetro e L o comprimento total do extensômetro aplicado a região de *gauge* do espécime.

2.4 A GEOMETRIA DA AMOSTRA

A maioria dos autores tem utilizado espécimes do tipo I ou IV conforme definidos pelo padrão ASTM D638 (ASTM-D634-14, 2016). A geometria destes espécimes, também conhecidos como *dog-bones* chatos, são largamente utilizados nos testes de tensão de diversos

materiais, incluindo plásticos, por serem fáceis de obter no corte de chapas, moldados ou extrudados e de fácil fabricação nas impressoras 3D. Pode-se facilmente imprimir esses espécimes com variações de diversos parâmetros relativos ao método de impressão 3D, como número de perímetros, temperatura de fusão do plástico e percentual de preenchimento das peças.

A geometria para um espécime voltado a ensaios de tração, conforme definido pelo padrão ASTM 638, possui três zonas distintas: zona de *grip*, zona de *gauge* e a zona de transição entre as duas. Geralmente duas zonas de *grip* nas extremidades, seguidas de duas zonas de transição com a zona de *grip* entre elas, conforme mostrado na **Figura 2.1**.



Figura 2.1: Geometria da amostra para teste de tração – ASTM D638

A zona de transição é formada por um segmento de círculo de um determinado raio (a depender do tipo do espécime) tangente ao extremo da zona de *gauge*. A **Figura 2.1** acima mostra a geometria geral para um espécime tipo *dog-bone* chato do tipo I, II, III e V. Um tipo IV é especificado pelo ASTM D638 para teste de comparação entre materiais de rigidez diferentes. As principais diferenças entre o tipo IV e os outros tipos são a zona de *grip* mais estreita e uma zona de transição formada por uma curva tangente tanto à zona de *gauge* quanto à zona de *grip*. Essa transição mais suave, permite uma melhor distribuição de forças ao longo do espécime de forma a evitar o rompimento fora da zona de *gauge*.

2.4.1 Amostras *dog-bone* chato

Apesar do espécime *dog-bone* chato Tipo I ou IV definido pelo padrão ASTM D638 serem utilizados largamente para o estudo da resistência a tração de diversos materiais, incluindo plásticos, e se mostrarem apropriados para a determinação da resistência a tração também de espécimes feitos em impressoras 3D FDM impressos no plano X-Y (**Figura 2.2**),

este padrão não dá conta de refletir em sua geometria o acamamento das camadas no sentido vertical (eixo Z), característico da impressão 3D por deposição de camadas.

Alguns autores (ALVAREZ C.; LAGOS C.; AIZPUN, 2016),(SANTHAKUMAR; MOHAMMED IQBAL; PRAKASH, 2017),(FERNANDEZ-VICENTE et al., 2016),(COSTA; FERREIRA DA SILVA; SOUSA CARNEIRO, 2019),(MONTERO; ROUNDY; ODELL, 2001), simulam a anisotropia existente no sentido do acamamento das camadas, usando espécimes ASTM D638 impressos deitados, mas com o sentido de impressão perpendicular a um dos eixos X-Y como na **Figura 2.3**. Esses espécimes são geralmente impressos ao longo dos eixos X e Y das impressoras 3D, ou seja, paralelos à mesa de impressão sendo esperado que do ponto de vista da resistência à tração, não haja variação entre as direções X e Y de uma peça impressa em 3D (considerando o preenchimento simétrico), mas os torna inadequados para a avaliação da resistência a tração devido a deposição das camadas ao longo da dimensão vertical de impressão.

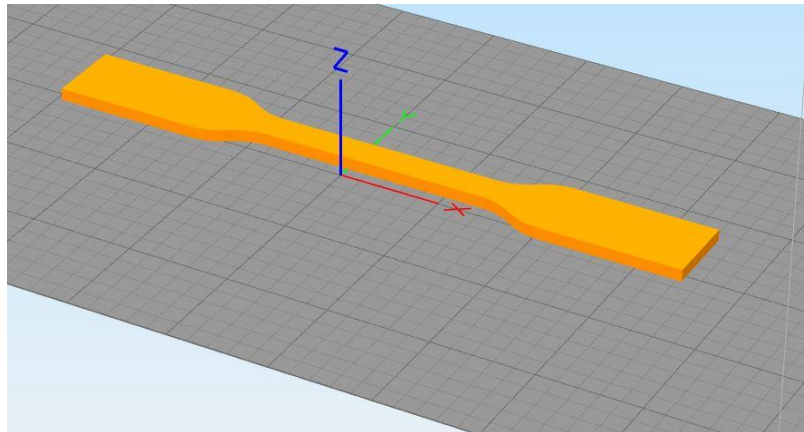


Figura 2.2: Dog-bone chato impresso deitado.

A obtenção da junção de camadas utilizando uma deposição horizontal perpendicular ao eixo do espécime, não traduz o mesmo efeito da anisotropia vertical devido à junção de camadas, uma em cima da outra, obtida quando imprimimos uma peça real. O valor obtido para a resistência a tração no sentido longitudinal do espécime impresso deitado, levará mais em conta os perímetros que estarão impressos no mesmo sentido e atuarão como se fossem um feixe contínuo de fios, o que representa parcialmente a resistência na direção de impressão. No sentido z de impressão de uma peça, a resistência a tração deve ser primordialmente devido ao contato entre as camadas e não ao longo de um feixe de fios.

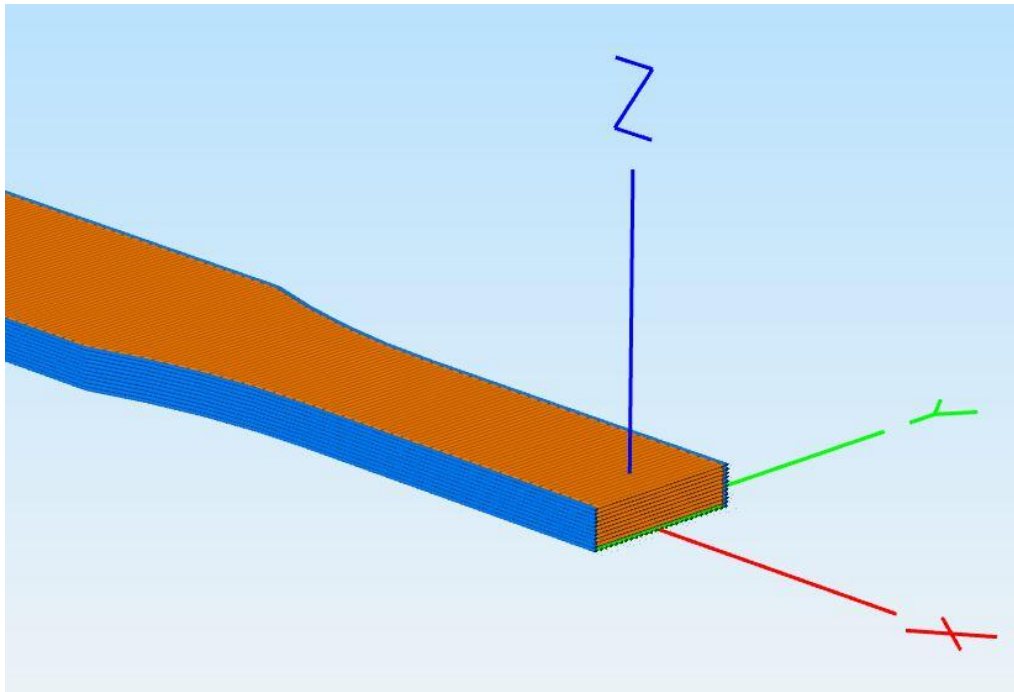


Figura 2.3: Seção transversal do dog-bone impresso deitado simulando o acamamento do eixo z.

Mesmo para o estudo da tensão de ruptura apenas em função do número de perímetros e temperatura, a impressão no modo *flat* traz algumas questões, uma vez que na impressão 3D a primeira camada, aquela em contato com a mesa de impressão, não só tem uma espessura diferente das outras camadas (geralmente 80%) porque o plástico é depositado espremido contra a mesa, não só para criar uma superfície maior de contato com a mesa para garantir que a peça fique presa à mesa, como também para criar uma superfície contínua formando uma ligação mais uniforme entre os fios depositados. Isso pode ser observado facilmente na peça impressa, uma vez que a superfície em contato com a mesa fica mais polida e com uma ligeira extensão para fora da peça (**Figura 2.4** e **Figura 2.5**).

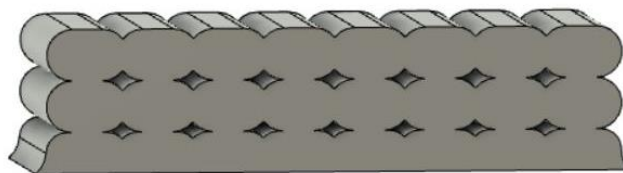


Figura 2.4: A impressão da primeira camada, mais “achatada”

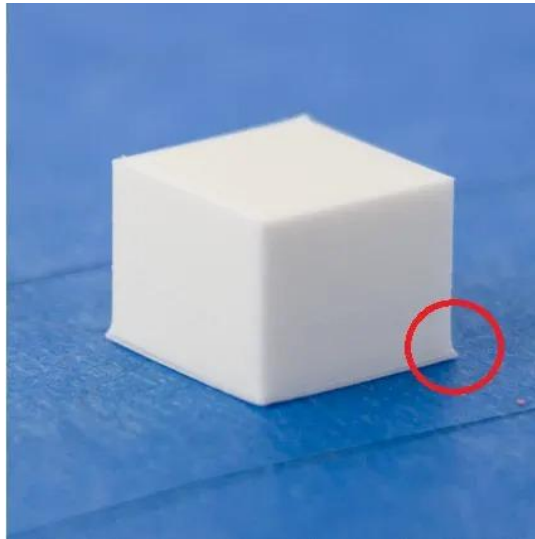


Figura 2.5: A impressão da primeira camada, mais “achataada”.

Quando a tração é avaliada em função de parâmetros de preenchimento, como ângulo e percentual de preenchimento (**Figura 2.6**), a deposição ao longo dos eixos X e Y não traduzem as mesmas ligações dos fios que em um acamamento na vertical. Em resumo, a contribuição para a resistência a tração devido à anisotropia vertical, em um espécime impresso em impressora 3D pelo processo de FDM, não é adequadamente avaliada com um espécime ASTM D638 impresso deitado.

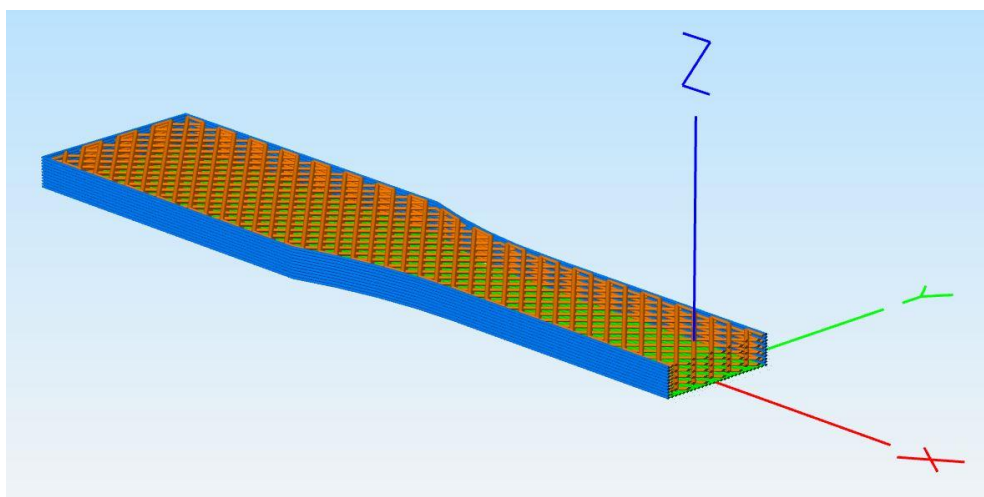


Figura 2.6: *Dog-bone* chato com preenchimento cruzado na impressão horizontal.

A solução seria imprimir o espécime na posição vertical. Entretanto, a impressão desses espécimes (tipo I ou IV - ASTM D638) no sentido vertical não só exige cuidados adicionais devido à pequena área em contato com a mesa de impressão (que dificulta a adesão com a mesa de impressão) como podem introduzir na peça impressa pontos não uniformes na deposição do plástico devido às acelerações e desacelerações do cabeçote de impressão (*jerk*) ao longo das arestas e mudança brusca de direção nos vértices devido à forma retangular da seção reta (**Figura 2.7**).

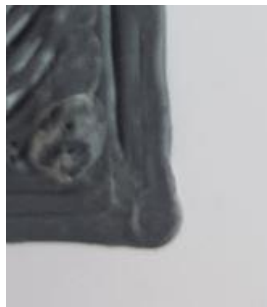


Figura 2.7: Alteração nos vértices causados por *jerk* e troca de direção do cabeçote de impressão.

Essas características podem variar muito em função dos firmwares de cada impressora. Além disso, um espécime ASTM Tipo I com dimensões da região de *gauge* de 13,0mm x 3,2mm nos dá uma área de 41,6 mm². Considerando um espécime impresso com pelo menos um perímetro (bico de 0,4mm, fator de largura de extrusão geralmente de 1,2 e camadas de 0,3mm), a área que sobra para o preenchimento é de aproximadamente 27,0mm², sendo uma das dimensões reduzidas a 2,2mm. Considerando 2 perímetros, essa dimensão reduz-se para meros 1,3mm, e nos deixa com uma área para preenchimento de aproximadamente 14mm² (esses valores podem ser menores ainda para camadas mais largas, com fatores de extrusão maiores que 1,2) (**Figura 2.8** e **Figura 2.9**). Com isso, a avaliação da contribuição do percentual de preenchimento, na resistência total do espécime, fica comprometida pela área relativamente pequena na região de *gauge* (*narrow section*) do espécime.

A adoção de uma amostra cilíndrica seria mais adequada, portanto, não só por permitir uma área interna maior (para analisar a contribuição do preenchimento na resistência do espécime) como tb para evitar pontos de singularidades nos vértices.

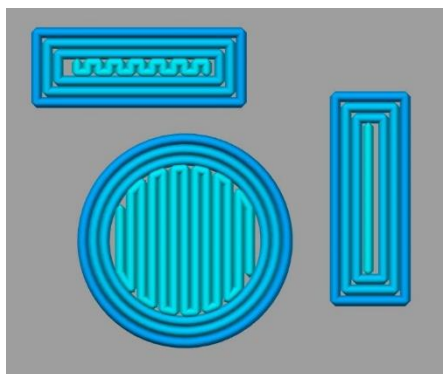


Figura 2.8: Seção reta mostrando diferenças das áreas de preenchimento entre uma amostra ASTM D638 tipo *dog-bone* chato e cilíndrico (100% de preenchimento)

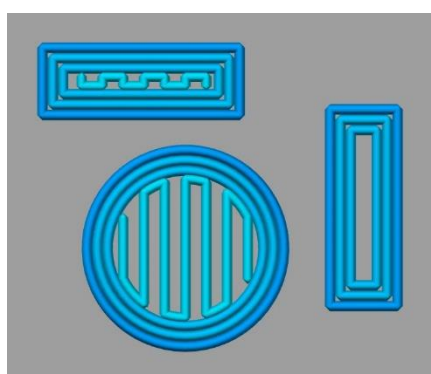


Figura 2.9: Seção reta mostrando diferenças das áreas de preenchimento entre uma amostra ASTM D638 tipo *dog-bone* chato e cilíndrico (50% de preenchimento)

A resistência de uma peça no sentido vertical de impressão, ou seja, entre as camadas, é devida não só à ligação entre os perímetros que constituem as paredes da peça, mas também devido à contribuição das ligações entre os fios utilizados no preenchimento (*infill*). Quanto mais vertical a deposição da parede maior a ligação entre as camadas (**Figura 2.10**). A geometria dos espécimes Tipo I e IV exige uma largura na região de *grip* maior que a largura do *gauge* para garantir que o espécime rompa nesta última região e que as tensões nesta região sejam perfeitamente transversais e uniformes. A curvatura de transição do espécime ASTM *dog-bone* chato entre a região de *gauge* e região do *grip* implica em um deslocamento lateral entre uma camada e outra (efeito escadaria) (**Figura 2.11**), reduzindo a área de contato entre os perímetros, resultando em zonas de fraqueza (AHMED; HASAN; LAL, 2017) o que pode comprometer o ensaio da amostra ocasionando o rompimento fora da região de *gauge*. Essa ligação pode, inclusive, ser facilmente rompida se o espécime for submetido a compressão transversal às camadas, que é o que geralmente acontece quando o espécime é colocado nas

garras da máquina de teste de tração e apertado, especialmente garras serrilhadas feitas para evitar o escorregamento do espécime. O resultado disso, somado à redução da ligação entre as camadas na área de transição *grip/gauge*, é o surgimento de áreas de fraqueza que ocasionam o rompimento do espécime fora da área do *gauge*, resultado que de acordo com o ASTM D638 deve ser descartado.

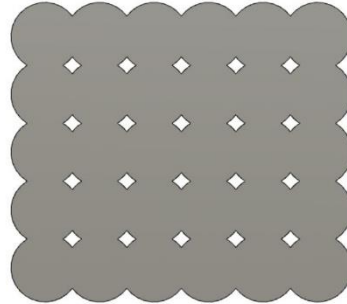


Figura 2.10: Deposição vertical com a área de contato máxima e mínimo “air-gap” entre as camadas

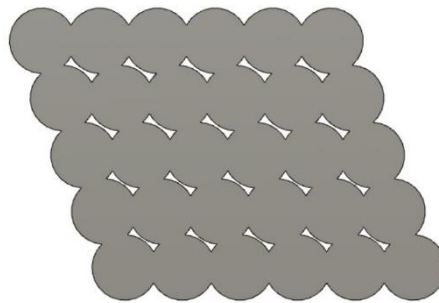


Figura 2.11: Deposição inclinada, em forma de “escadaria”, reduz a área de contato entre as camadas.

A recomendação do ASTM (ALVIN J FLINT, 1998) para os espécimes submetidos a teste de tração é que estejam livres de cortes e rachaduras ou qualquer outra irregularidade que venha a provocar o rompimento prematuro do espécime devido a um ponto de fraqueza localizada, produzindo falsos resultados. Tipicamente, os espécimes Tipo I e IV para termoplásticos, devem ser moldados.

2.4.2 Amostra cilíndrica

O ASTM D638 especifica também uma amostra cilíndrica para espécimes rígidos e sólidos com parâmetros geométricos bem variados. Entretanto, a experiência mostra que tantos os espécimes *dog-bone* chatos quanto os espécimes cilíndricos especificados pelo ASTM D638,

precisam ser adaptadas à realidade do processo de fabricação FFF, especialmente no que tange ao design. Essas modificações são necessárias por imposição dos padrões de teste, mas principalmente devidas à geometria dos espécimes, que quando impressos no método camada a camada, apresentam características diferentes dos espécimes preparados pelos métodos convencionais de injeção, moldagem, prensagem ou fresagem, para os quais os padrões foram especificados. Ao tempo deste trabalho, o ASTM ainda não criou uma especificação para teste de tração em espécimes impressos em impressoras 3D.

Algumas das modificações necessárias nas amostras convencionais de testes devido ao padrão peculiar do método de impressão 3D por FDM, estão relacionadas a:

- Força lateral imposta pela garra (*grip*);
- Garantia de que a linha de ação da força aplicada coincida com o eixo maior do espécime;
- Recobrimento entre camadas na interface entre zona de *gauge* e zona de *grip*;
- Descolamento das camadas devido a escorregamento no *grip*.

- **Pressão lateral da garra (*grip*)** – No teste de tensão os espécimes a serem testadas são presos à máquina de tração por garras que seguram o espécime pelas extremidades, nas zonas de *grip*. Existem vários tipos de garras, a depender da geometria do espécime sendo testado.

Entre as recomendações relativas à forma como o espécime é preso à máquina de tração, duas são as mais importantes: As garras devem ser auto-centrantes e prender o espécime de forma a garantir que a linha de ação da força aplicada esteja coincidente com o eixo maior do espécime de forma a evitar torções e deformações que não sejam aplicadas ao longo desta linha; e, agarrar firmemente o espécime com uma força tal a evitar o escorregamento dentro da garra mas não forte o suficiente para esmagar o espécime. O ASTM D638 recomenda que se existir escorregamento do espécime na garra o teste seja invalidado. Ao escorregar na garra, um alívio momentâneo de tração no espécime ocorre e isso compromete o resultado do teste, especialmente para o cálculo da elongação. No caso de amostras *dog-bone* chatas, as mandíbulas da garra são planas e elas podem ser serrilhadas ou recobertas por materiais abrasivos para aumentar a adesão do espécime e evitar o escorregamento.

- **Transição entre a zona de *grip* e a zona de *gauge*** – Na geometria dos *dog-bones* chatos sugeridos pelo ASTM D638 tipos I, II, III e V a transição entre a zona de *gauge* e a zona de *grip* é feita por um segmento de círculo, nascendo na zona de *gauge* e interceptando a linha

reta da zona de *grip*. Na geometria da amostra tipo IV, usa-se duas curvas com raios diferentes (razão de 1: 0,56)(ASTM-D634-14, 2016). Este tipo é sugerido para amostras cujo rompimento está acontecendo próximo à zona de *grip* e tem uma zona de *grip* com largura maior.

2.5 PADROES DE PREENCHIMENTO

Os programas de fatiamento permitem o preenchimento da parte interna de um objeto impresso com muitos padrões geométricos diferentes que vão de preenchimentos em linhas retas ou cruzadas até desenhos como favo de abelha (*honeycomb*) ou formas sofisticadas como estrelas, bonecos e animais (**Figura 2.12**). As diferentes formas de preenchimento podem resultar em diferentes resistências estruturais à compressão e resistência a tração em uma peça impressa (FERNANDEZ-VICENTE et al., 2016), (GOPSILL; HICKS, 2016), (SAJJAD et al., 2019), e em diferentes relações custo/benefício no que tange a material gasto e/ou tempo de impressão (BAICH; MANOGHARAN; MARIE, 2015). O estudo de padrões de preenchimento, especialmente geometrias de estruturas tridimensionais, para aplicações biomédicas, como fabricação de ossos artificiais, e engenharia, na obtenção de peças leves e resistentes, tem sido largamente realizado uma vez que essas estruturas conferem excelentes propriedades mecânicas, especialmente à compressão (ZHANG et al., 2015). Atualmente, como uma das funções primordiais do preenchimento é a sustentação de camadas de fechamento superiores de um modelo (a impressora 3D não pode imprimir sem um suporte adequado senão as camadas de fechamento colapsam), estão surgindo em alguns fatiadores, a possibilidade de preenchimento em árvore, em que de um pilar interno derivam galhos que vão sustentar as camadas superiores. Entretanto, esse tipo de preenchimento não contribui (ou contribui muito pouco) para a resistência à tração e a resistência a compressão de uma peça.

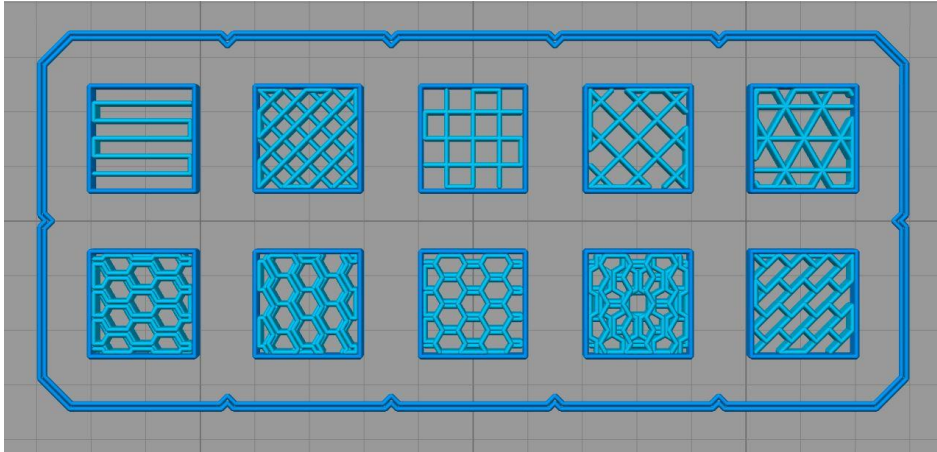


Figura 2.12: Exemplos de alguns padrões de preenchimento utilizados pelos softwares de fatiamento.

2.6 PARÂMETROS RELEVANTES PARA A ANÁLISE DA RESISTÊNCIA ANISOTRÓPICA NO FDM.

A partir da pesquisa de outros autores podemos obter uma lista dos parâmetros que mais influenciam o processo de impressão por FDM. Entre eles, espessura da camada, percentual de preenchimento, ângulo de preenchimento, largura da deposição, temperatura do filamento, número de perímetros, diâmetro do bico, material, velocidade de extrusão, *air gap*, temperatura do modelo, orientação do modelo, representação do modelo (parâmetros do fatiamento), temperatura do envelope de impressão, cor do material, velocidade de fluxo do material, velocidade da mesa, caminho do cabeçote, pós-processamento da parte impressa, geometria do modelo e outros (ALI; CHOWDARY; MAHARAJ, 2014; BRAHMBHATT; PATEL; BRAHMBHATT, 2015; CHRISTIYAN; CHANDRASEKHAR; VENKATESWARLU, 2016; GONABADI; YADAV; BULL, 2020; LANZOTTI et al., 2015; SANTHANABHARATHI; VENKATRAMANAN, 2017; SOOD; OHDAR; MAHAPATRA, 2009; SREEDHAR; MATHIKUMARMANIKANDAN; JOTHI, 2012; TORRES et al., 2016; WANG et al., 2019). A **Figura 2.13** mostra a distribuição relativa dos principais parâmetros do FDM analisados na literatura.

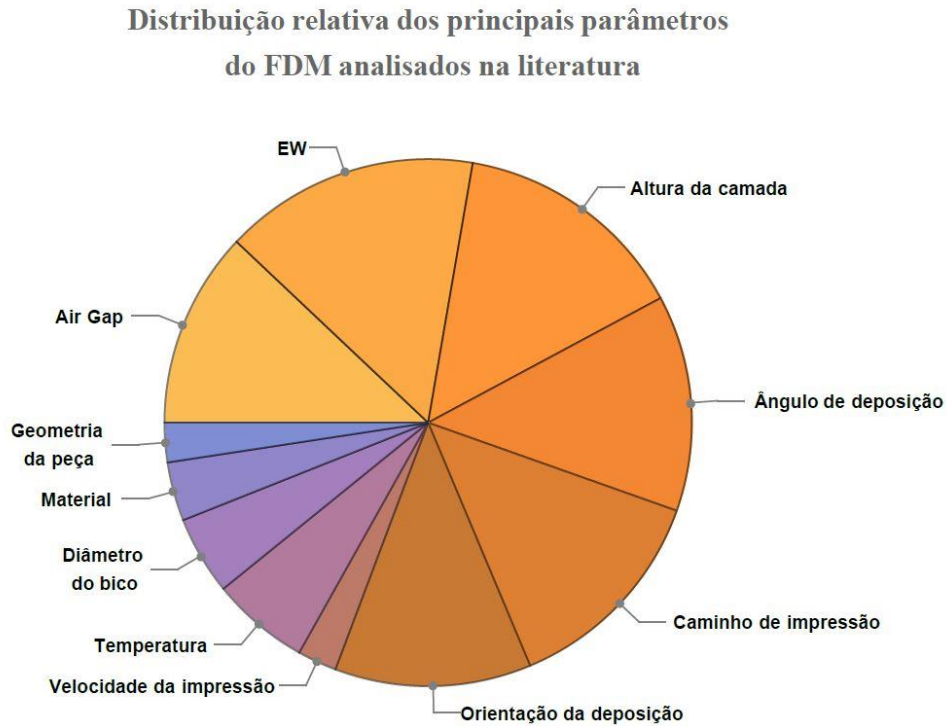


Figura 2.13: Distribuição relativa dos parâmetros FDM investigado na maioria das publicações.

Alguns desses parâmetros são relacionados a outros estudos que não apenas o de resistência à tração, mas sim a outras propriedades mecânicas (deformação, flexão e fadiga,), a determinação de rugosidade superficial das peças, precisão dimensional e tempo de impressão. A maioria dessas pesquisas foram realizadas utilizando ABS e através de amostras *dog-bone* flat impressas no plano X-Y, o que não caracteriza especificamente a importância dos parâmetros quando pensamos no estudo da anisotropia no sentido vertical de impressão.

Do estudo apresentado acima sobre a deposição das camadas, fica claro que os parâmetros mais importantes na resistência à tração no sentido vertical de deposição são os perímetros, percentual de preenchimento, altura das camadas e temperatura de extrusão. O parâmetro Orientação de deposição tem a ver com o sentido de colocação da peça no plano XY, o Ângulo de Deposição tem a ver com o preenchimento e com as camadas de fechamento da peça, que claramente não contribuem par a resistência no sentido vertical. O *air gap* é um parâmetro não controlável que resulta de outros parâmetros e que será analisado posteriormente.

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo descrevemos os equipamentos construídos e usados nesta pesquisa bem como os métodos utilizados para a obtenção da relação entre os parâmetros de impressão e a resistência de peças impressas.

3.1 MÁQUINA PARA OS ENSAIOS DE TRAÇÃO

Um elemento chave na pesquisa, devido ao número grande de ensaios que foram realizados, foi a disponibilidade imediata de uma máquina de testes de tração no laboratório, sem ter que passar pela burocracia e tempo de espera envolvido em testes realizados em máquinas em outros departamento ou laboratórios externos. Uma vez que não dispúnhamos de uma máquina de teste universal (UTM – Universal Testing Machine)) e devido ao alto custo deste tipo de equipamento e a indisponibilidade de recursos financeiros da pesquisa, optamos por construir um dispositivo (hardware e software) capaz de executar testes de tensão.

Uma máquina de testes de tração foi construída durante essa pesquisa e um artigo intitulado “LOW COST TENSILE TESTING MACHINE FOR FDM PARTS MECHANICAL BEHAVIOR CHARACTERIZATION” foi apresentado no Congresso Internacional de Engenharia Mecânica – COBEM 2017. (CAVALCANTE *et al.*, 2017).

3.1.1 Especificações e requisitos da máquina de teste de tração.

O projeto da máquina de testes de tensão foi conduzido levando-se em conta os requisitos da própria pesquisa, mas também, principalmente, concordância com as especificações dos padrões de testes de tensão do ASTM – *American Society for Testing and Materials*.

3.1.1.1 Requisitos da pesquisa para a máquina de ensaios de tensão

- Capacidade de realizar testes envolvendo trações de até 5 kN. Este valor foi escolhido por representar uma margem segura de duas vezes o valor da carga esperado para o teste de tração para os espécimes do mesmo tipo dos utilizados. Além disso, este valor é maior do que o esperado para espécimes de outros plásticos como acrílico, pvc e até mesmo outros tipos de plásticos usados em impressoras 3D e que foram usados durante o projeto para comparações e calibração da máquina de teste;
- Um atuador elétrico, acionado por um microcontrolador capaz de variar a velocidade da aplicação da carga e adquirir dados da carga aplicada, *encoders*, *strain gage*, extensômetros e outros sensores como de temperatura e humidade;
- Um software de gerenciamento capaz de controlar e monitorar a máquina durante o ensaio, receber os dados em tempo real e gerar gráficos, relatórios, bem como o gerenciamento das informações das amostras e espécimes do plano de testes;
- Ter um baixo custo de fabricação, usando materiais facilmente encontrados no mercado com um mínimo de partes fresadas, torneadas ou dependente do serviço de terceiros;
- Permitir a troca de garras para espécimes de geometrias diferentes, tais como ASTM D638 (*flat dog-bone*) (ASTM-D634-14, 2016), ASTM E8/E8M (ASTM E8, 2010) (cilíndricos) e outros;
- Ser robusta o suficiente para garantir que o único elemento sob tensão é o espécime ensaiado;
- Garantir repetibilidade nos ensaios;

3.1.1.2 Especificações ASTM para uma máquina de ensaio de tensão

Considerando o escopo da pesquisa em curso, a máquina de teste de tensão foi projetada também em acordo com as recomendações contidas nos padrões ASTM 638 - Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics (ASTM-D634-14, 2016), ASTM E4 - Standard Practices for Force Verification of Testing Machines (ASTM-E4, 2014) e ASTM E83 - Standard Practice for Verification and Classification of Extensometer Systems (ASTM-E83, 2010):

- Uma célula de para medir a força de tração aplicada no espécime com precisão de 1%. O padrão ASTM E4 estabelece os procedimentos para a calibração dos dispositivos de medida de carga;
- Um mecanismo de tração capaz de aplicar uma velocidade constante durante todo o ensaio;
- Garras com auto alinhamento capazes de se mover livremente em três graus de liberdade quando a força for aplicada tal que o eixo maior do espécime coincida com a direção da aplicação da força;
- Garras com mandíbulas serrilhadas para prevenir o escorregamento do espécime sendo testado;
- Um método para medir a extensão da seção transversal;
- Um extensômetro para medir a elongação da zona de “*gauge*”, (onde vai acontecer a ruptura e onde é feita a medida da elongação) do espécime durante a aplicação da carga;
- Registro do tempo de ensaio;
- Medidas de temperatura e humidade do ambiente durante o ensaio.

3.1.2 Construção da máquina para os ensaios de tração

Apesar de que algumas máquinas de teste de tensão existentes no mercado usam um sistema de acionamento composto de duas colunas para gerar tração, optamos no nosso projeto por construir um sistema atuador com apenas um eixo de aplicação de força.

3.1.2.1 Mecânica

A máquina construída para essa pesquisa é composta de uma estrutura feita com dois tubos de aço carbono de 34 mm de diâmetro com 74 cm de comprimento, unidos no topo por uma placa de aço soldada longitudinalmente aos tubos formando uma estrutura rígida. Duas barras roscadas de aço inox com 16 mm (M16) e 1 m de comprimento cada, passam longitudinalmente dentro dos tubos e prendem fortemente com porcas uma outra placa de aço carbono na base dos tubos, fechando rigidamente a estrutura retangular, permitindo assim que as forças aplicadas pelo sistema trator permaneçam internas a armação. O Apêndice IV contém os diagramas da máquina de testes.

A parte inferior das barras roscadas são usadas para prender a estrutura retangular à base da máquina, feita de perfis retangulares de alumínio, mantendo a estrutura alta o suficiente para

comportar na parte de baixo da máquina o sistema atuador. Neste espaço estão também acomodadas a fonte de alimentação e toda a eletrônica de controle da máquina (**Figura 3.3**). O eixo do atuador passa através de um furo na placa base da estrutura rígida retangular. Uma caixa de placas de PVC envolve essa parte, dando à máquina uma aparência profissional como podemos ver na **Figura 3.1**.

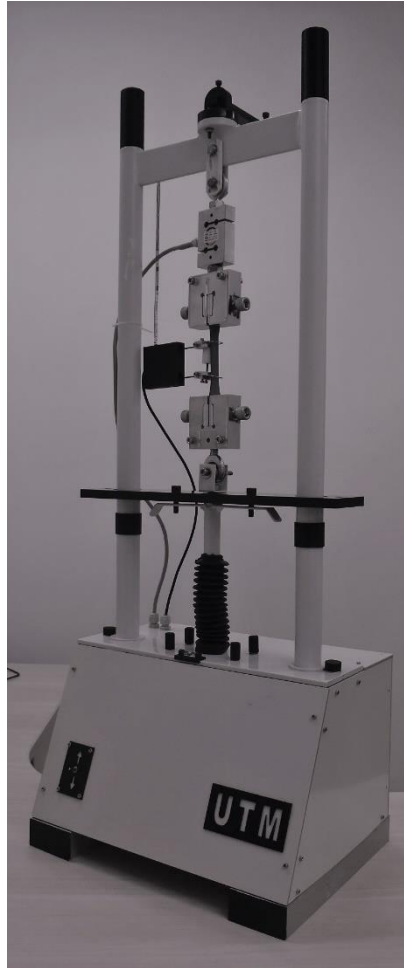


Figura 3.1: A máquina de teste pronta para um ensaio com um espécime e o extensômetro instalado.

O mecanismo atuador foi projetado para gerar uma tração maior que a máxima tração de 5 kN suportada pela célula de carga utilizada, de modo a assegurar uma margem confortável de trabalho dentro das trações esperadas para os ensaios desta pesquisa bem como prover a precisão requerida nas medidas. O atuador usa um fuso feito de uma barra roscada de aço inox de 12 mm (M12) que traciona um tubo de aço carbono com rosca interna nas extremidades. A extremidade superior deste tubo é ligada à garra inferior da máquina através de um terminal

rotulado esférico capaz de prover os graus de liberdade necessários para o alinhamento do espécime.

O eixo do atuador é alinhado através de dois mancais com flanges, separados por um bloco cilíndrico de nylon de 80mm de diâmetro por 40mm de espessura e conectado a uma engrenagem de 120 mm de diâmetro com 120 dentes. Esta engrenagem é acionada por uma outra engrenagem menor de 20 dentes acoplada ao eixo de uma caixa de redução de 125:1 por sua vez diretamente acoplada a um motor DC de 1200 rpm. Todo o conjunto permite ao eixo do atuador produzir no sistema trator um movimento vertical de 2,8 mm por minuto.

Um circuito eletrônico de modulação por comprimento de pulso (PWM) controlado por software permite que a velocidade do atuador seja reduzida para os 2 mm por minuto ou menos, conforme recomendado pela ASTM para o tipo de teste sendo realizado. Ainda, um *encoder* acoplado à parte inferior do eixo do atuador provê uma medida comparativa da velocidade rotacional do atuador. O uso deste dispositivo é, entretanto, opcional.

O conjunto inteiro do atuador (**Figura 3.2**) – eixo, mancais, rolamentos de encosto, engrenagens e motor – é preso a uma placa de aço carbono de 180 mm x 70 mm com 10 mm de espessura que por sua vez é presa à base de aço inferior da estrutura retangular por quatro parafusos longos de 8 mm (M8).

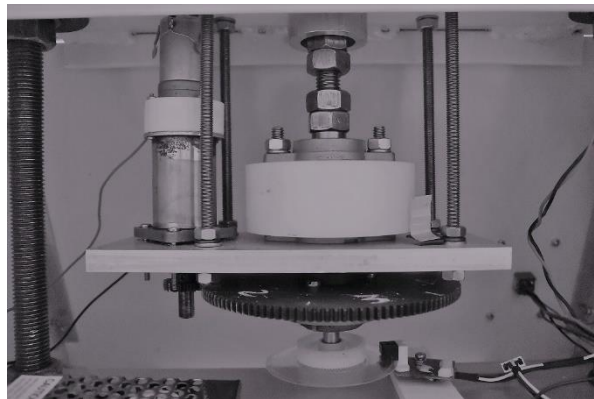


Figura 3.2: O mecanismo do atuador. Um motor com redução traciona o eixo acoplado à garra inferior.

Na parte da frente da máquina, uma chave de duas posições permite mover manualmente o atuador para cima ou para baixo de forma a facilitar o ajuste da distância entre as garras que vão prender o espécime a ser testado. Na parte posterior da máquina estão a chave liga/desliga,

o conector do cabo de força e a porta USB para a conexão do microcontrolador com o computador e o software de controle da máquina e aquisição de dados (**Figura 3.4**).

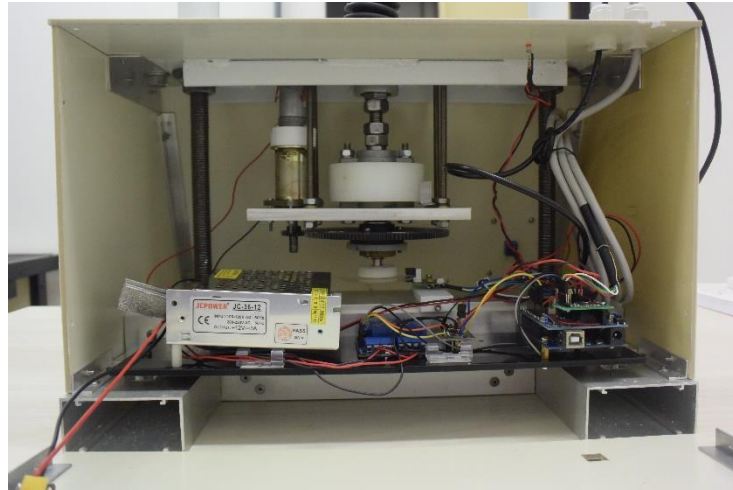


Figura 3.3: Parte inferior da máquina contendo atuador, e eletrônica.

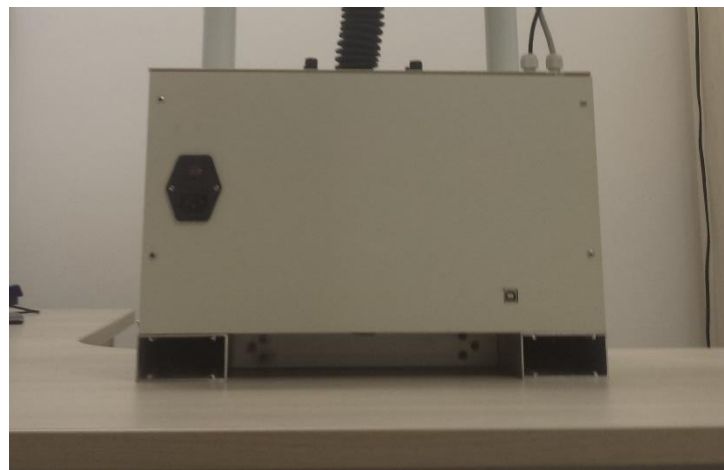


Figura 3.4: Painel posterior com conector de força e conector USB.

3.1.2.2 Eletrônica

A eletrônica da máquina de teste foi mantida simples para reduzir custos. Uma fonte de alimentação, uma placa com um microcontrolador, dois relés, um transistor de potência, um *encoder* (opcional), um sensor de umidade, um sensor de temperatura e duas placas de condicionamento de sinal HX711 próprias para leitura de célula de carga: um para medir a força

aplicada à célula de carga ligada ao espécime e o outro para ler os dados do extensômetro. Na verdade, poderíamos usar apenas uma dessas placas (a HX711 IC possui um sensor de canal duplo) para a célula de carga e o extensômetro, mas decidimos montar o extensômetro com sua própria placa de condicionamento em uma única montagem individual para facilitar a troca do extensômetro. Um diagrama das conexões de todas essas partes é mostrado na **Figura 3.5**.

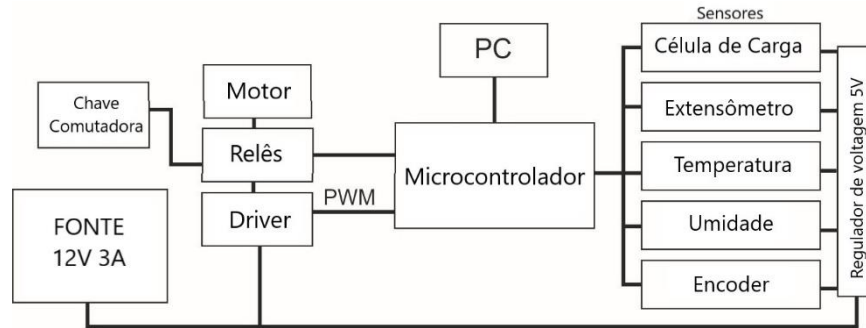


Figura 3.5: Diagrama da Eletrônica da Máquina de Tração.

A eletrônica da máquina utiliza uma fonte de alimentação regulada de 12 Volts DC e 3A, suficiente para acionar o motor e os relés. Um regulador de tensão LM7805 é usado para obter os 5 Volts necessários para acionar os outros circuitos e sensores. Os dois relés são usados para inverter a direção do movimento do motor e são comandados pelo microcontrolador. Além disso, eles são conectados a uma mini chave seletora na frente do painel da máquina para permitir que o operador mova o atuador para cima e para baixo manualmente.

Uma pequena placa de controle com um transistor de potência é usada para controlar a corrente que vai para o motor, a fim de controlar a velocidade do atuador. A base do transistor é conectada a um pino de saída PWM da placa do microcontrolador. Diferentes velocidades predefinidas (valores predefinidos do *duty cycle* para o *PWM* no *firmware* do microcontrolador) podem ser selecionadas por um comando do software de controle no PC. O valor padrão da velocidade do atuador é configurado para 2 mm por minuto.

A placa do microcontrolador é conectada ao PC através de um cabo USB. O firmware em execução no microcontrolador lê continuamente a porta serial e executa comandos recebidos do software de gerenciamento e aquisição de dados no PC. Esses comandos podem alterar a velocidade do motor, iniciar e parar o motor, alterar a direção do movimento do atuador, ler a temperatura e a umidade, ler a força aplicada à célula de carga, ler o deslocamento do

extensômetro, tempo do ensaio etc. Os valores dos dados são enviados de volta para o programa de aquisição em um fluxo de caracteres alfanuméricos simples. A taxa de amostragem padrão é de 2 Hz (uma amostragem a cada 500 ms), mas pode ser configurada para 5 Hz (200 ms) no software de gerenciamento e aquisição no PC antes do início do ensaio (este limite é imposto pela velocidade máxima do HX711). A precisão para ambas as medidas, de carga e extensômetro é de 0,2%. Uma imagem da montagem eletrônica é mostrada na **Figura 3.6**.

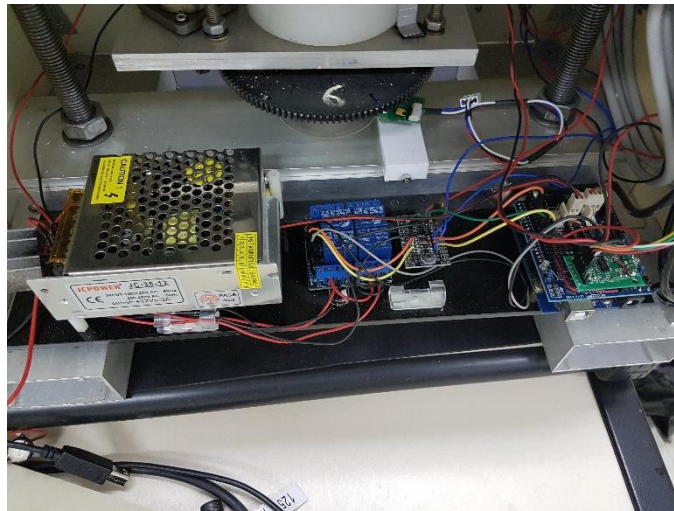


Figura 3.6: Montagem da eletrônica.

3.1.2.3 O software de gerenciamento e aquisição de dados

Um computador PC executando um software escrito pelo autor em .NET C# é usado para controlar o aparato e coletar os dados brutos da Máquina de Teste (**Figura 3.7**). O software faz todas as conversões e análises necessárias para determinar a força máxima de ruptura da amostra e outros parâmetros relacionados ao teste de tração. O software também plota em tempo real os gráficos de tensão x alongação (*Strain x Stress*) (**Figura 3.8**), mostra tabelas de dados, imprime relatórios de teste e exporta gráficos e dados como texto simples ou em formato de tabela para o MS Excel. Gráficos e relatórios podem ser impressos para o teste de um único espécime ou para o conjunto de espécimes de uma amostra. Os dados brutos são salvos em arquivos de formato XML e podem ser carregados a qualquer momento para análise posterior.

Usando uma arquitetura orientada a objeto, três classes principais são definidas no software: amostra, espécime e ensaio. A classe “amostra” define a coleção de amostra a ser testada, com as mesmas características geométricas e físicas incluindo os parâmetros de

impressão. As instâncias dessa classe contêm uma coleção da classe “especime” que representa o objeto físico impresso, a ser testado. Eles são identificados por um número sequencial gerado automaticamente pelo programa. A classe "ensaio" tem uma instância para cada espécime e contém todos os dados brutos do teste (tração e alongação), bem como alguns valores calculados durante o teste. Os valores de tensão (*Stress*) e de deformação (*Strain*) são sempre calculados durante a exibição de gráficos ou tabelas. A tensão é expressa em unidades MPa considerando a área transversal da região de “*gauge*” do corpo de prova, medida usando um paquímetro ou micrômetro e fornecida quando do cadastro da amostra. A deformação (Strain) (ε) é calculada em porcentagem de mm/mm usando a Equação (4), onde Δl é o valor medido no extensômetro e l_0 é o comprimento da medida entre as lâminas do extensômetro (DAVIS, 2004).

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100\% \quad (4)$$



Figura 3.7: A tela principal do programa de controle e aquisição da máquina de teste.

A interface do software mostra os botões necessários para controlar a máquina e exibir em tempo real os valores de carga, deslocamento do extensômetro e tempo de teste. Também

mostra os valores de temperatura, umidade e os valores para ajuste no início do teste. Também exibe em tempo real um painel de abas com gráfico de carga X extensão entre as garras (*crosshead extension*), gráfico de carga X deslocamento medido no extensômetro e gráfico do deslocamento medido no extensômetro X tempo do teste. Qualquer um desses gráficos pode ser selecionado para visualização durante o teste sem perturbá-lo. Após o teste, anotações e medições podem ser feitas nos gráficos usando um cursor cruzado integrado. Uma tabela dos dados amostrados pode, opcionalmente, ser exibida em tempo real na tela durante o teste. Ao término do ensaio os dados brutos adquiridos são gravados no arquivo da amostra em formato XML.



Figura 3.8: Um gráfico Tensão-Alongamento (Stress-Strain).

Em um ensaio de tração, a informação mais importante é a tensão (Stress) e a deformação (Strain) no ponto de ruptura. O sistema calcula e grava automaticamente esses valores e um gráfico de Tensão-Deformação pode ser gerado no menu “Gráfico”, tanto para o espécime corrente como também para todos os espécimes de uma amostra. O mesmo pode ser obtido para os dados de Tensão-Alongamento máquina (**Figura 3.9**).

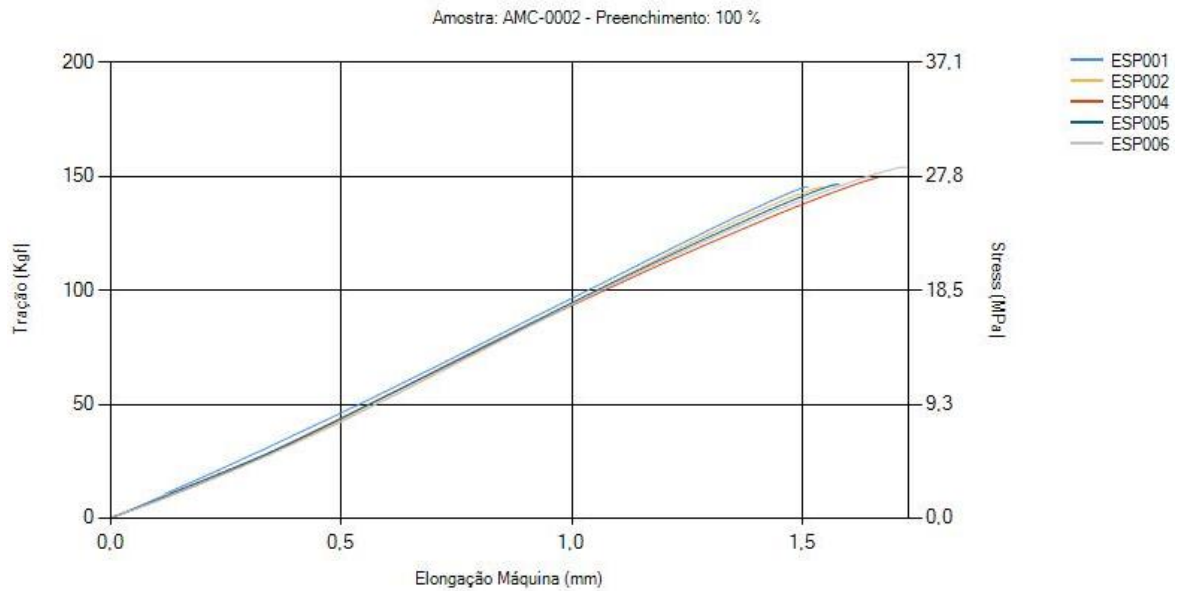


Figura 3.9: Gráfico de Tração-Elongação máquina para os espécimes de uma amostra.

O programa permite ainda gerar um relatório com os ensaios de todos os espécimes de uma amostra, contendo as informações da amostra, uma tabela com os valores máximo e mínimo de tração e tensão, valores de tração e tensão no ponto de ruptura e a elongação. São também mostrados nesta tabela os valores máximo e mínimo entre os espécimes testados, o valor médio das trações e tensões e o desvio padrão. O relatório inclui também um gráfico de Tensão-Elongação com os ensaios de todos os espécimes da amostra (**Figura 3.10**).

Amostra AMC-0002

Amostra: AMC-0002 - Material: PLA - Cor: Cinza claro - Data de Cadastro: 25/05/2018 11:05:32
 Tipo: Bone cilíndrico - Temperatura Preparo: 220°C - Marca: MB - Orientação Preenchimento: Z
 Largura: 18mm - Espessura: 8,29mm - Comprimento: 100mm - Área no gauge: 53,98mm²
 Camadas na Base: 3 - Camadas no Topo: 3 - Nº de Perímetros: 1
 Percentual Preenchimento: 100% - Tipo Preenchimento: Linear - Ângulo de Preenchimento: 45°

Observação: Amostra com espécimes D-Bone cilíndrico com 18mm de diâmetro no grip e 8mm no gauge. Fixação com parafuso de 8mm. Rosca feita na impressão com 10mm de profundidade. Espécime de 10 cm de comprimento com 40 cm de comprimento de gauge. Este a primeira amostra com infill 100%. Primeira amostra válida para os ensaios da primeira fase com espécimes cilíndricos.

Espécime	Tração Máxima (kN)	Tensão Máxima (MPa)	Tração Ruptura (kN)	Tensão Ruptura (MPa)	Elongação Ruptura (mm)
ESP001	1,46	26,98	1,46	26,98	0,17
ESP002	1,45	26,93	1,45	26,93	0,12
ESP004	1,49	27,69	1,49	27,69	0,15
ESP005	1,47	27,16	1,47	27,16	0,20
ESP006	1,60	29,57	1,60	29,57	0,13
Média	1,49	27,67	1,49	27,67	0,15
Desv Padrão	0,06	1,11	0,06	1,11	0,03
Mínimo	1,45	26,93	1,45	26,93	0,13
Máximo	1,60	29,57	1,60	29,57	0,20

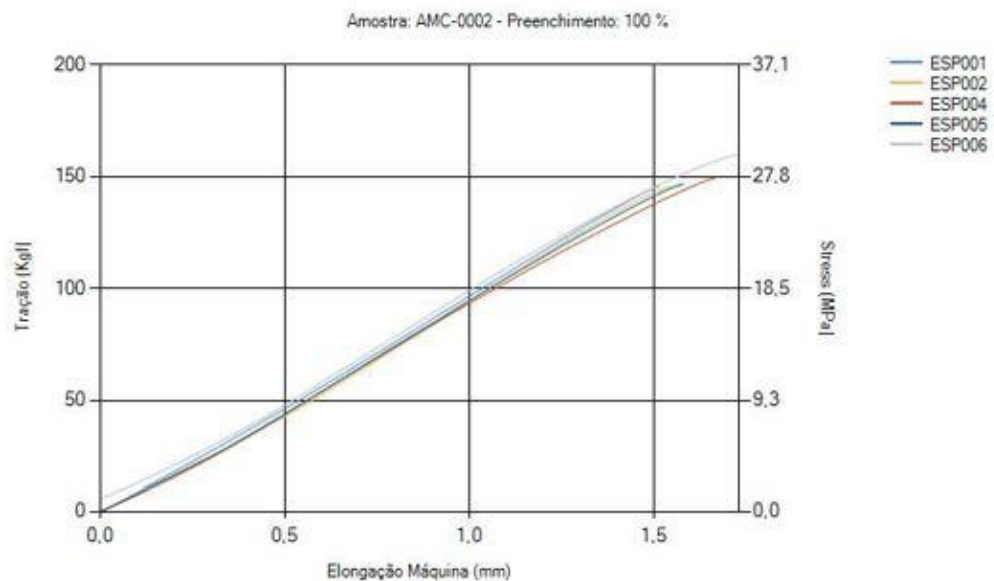


Figura 3.10: Exemplo de relatório emitido pelo programa.

3.1.3 Garras

As garras são uma parte muito importante de uma máquina de ensaio de tração. São elas que vão segurar e transmitir a tração exercida pelo atuador ao corpo de prova. De acordo com ASTM-D638, as garras devem ser tão rígidas quanto possível, para não sofrerem deformações mensuráveis dentro das faixas de forças aplicadas durante os testes. Além da resistência, duas outras condições importantes devem ser observadas: As conexões das garras com a parte fixa da máquina e com o atuador devem ser feitas de modo a permitir o auto alinhamento das

garras/corpo de prova, para que, assim que a tração é iniciada, a direção da força aplicada coincide com o eixo longitudinal da amostra que está sendo testada. A outra condição refere-se a evitar, tanto quanto possível, o escorregamento da amostra usando garras com superfícies de contato serrilhadas.

Inicialmente, dois conjuntos de garras foram fabricados para nossa máquina, ambos usinados em CNC a partir de blocos de alumínio 6351 (dureza Brinell 95). Um conjunto de garras com mandíbulas de cunha (**Figura 3.11**) e um conjunto de garras com mandíbulas do tipo morsa paralelas (**Figura 3.12**). Os dois conjuntos foram dimensionados para o uso de amostras planas tipo “*dog-bone*” (ASTM-D638 Tipo II), com projeções laterais nas mandíbulas para auxiliar o operador a acomodar o espécime o mais alinhado possível aos eixos das garras. Foi utilizada uma lixa colada às mandíbulas em vez das superfícies serrilhadas e em ambos os conjuntos de garras, esta técnica mostrou-se adequada para evitar o deslizamento da amostra. Essas garras para “*dog-bones*” chatos foram confeccionadas porque no início da pesquisa foram usados espécimes deste tipo para a calibração da máquina.



Figura 3.11: Garras mandíbulas em cunha.

As garras com mandíbulas em forma de cunha têm a característica valiosa de aumentar a aderência lateral da amostra à medida que a tração é aplicada longitudinalmente, evitando o deslizamento da amostra. No entanto, como o material (plástico) usado em nossos espécimes sofre uma mudança de espessura relativamente grande quando submetido à tração, essa variação é traduzida por um apreciável deslocamento entre as mandíbulas e a própria garra, o que compromete as medidas de extensão, tanto a realizada pelo extensômetro na zona do “*gauge*” da amostra (extensão) quanto a realizada para determinar a extensão entre as garras

(*crosshead extension*). Este tipo de garra aplica-se muito bem a amostras com pouca ou nenhuma variação na espessura sob tensão (espécimes metálicos, por exemplo).

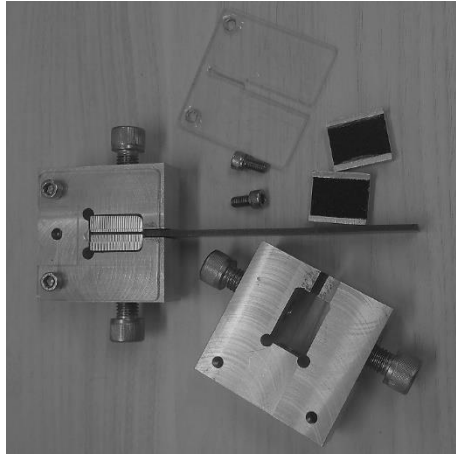


Figura 3.12: Garras com mandíbulas paralelas tipo morsa.

As garras de mandíbulas paralelas tipo morsa atuam como um torno onde a pressão na amostra é exercida pelo aperto de dois parafusos laterais de 12 mm (M12). Foram usinadas como um bloco de 70 mm x 70 mm com uma espessura de 25 mm. O design da garra evita o deslizamento das garras e atua como uma mola para compensar as variações da espessura da amostra quando submetidas à tração. Na parte superior da garra, um furo com rosca permite a conexão da garra com a célula de carga usando um parafuso de 12 mm (M12). Duas placas de acrílico de 2 mm de espessura que acompanham a forma da garra completam a montagem e garantem o alinhamento dos espécimes com as mandíbulas no interior da garra.

O uso de um conector esférico rotulado para conectar a célula de carga à parte superior da estrutura fixa da máquina e outro semelhante para conectar a garra inferior ao sistema do trator fornece à montagem os graus de liberdade necessários em cada extremidade, garantindo que a interação das forças no teste uniaxial esteja confinada a uma única dimensão linear e coincidente com o eixo longitudinal da amostra.

Apesar desses tipos de garras poderem ser utilizadas em espécime rígidos e com densidade uniforme, onde o escorregamento ou esmagamento do espécime podem ser evitados, tanto para os espécimes *dog-bones* chatos quanto para os espécimes cilíndricos impressos verticalmente, a fragilidade das ligações entre as camadas imposta ao espécime pelo método de impressão FDM, é susceptível a força de aperto das mandíbulas, comprometendo a fixação

adequada do espécime sendo testado. Um aperto capaz de evitar o escorregamento nas mandíbulas, certamente causara rompimento das ligações entre as camadas, mesmo para zonas de *grip* impressas com 100% de preenchimento. Da mesma forma o serrilhamento das garras funciona como alavancas ou cunhas que também podem causar o descolamento entre as camadas na zona de *grip*.

Daí a necessidade de se projetar garras com geometrias especiais ou ainda, geometrias especiais para a zona de *grip*. Na fase inicial deste trabalho várias geometrias da zona de *grip* e diferentes garras, foram projetadas e testadas para obter um conjunto amostra-*grip* que permitisse realizar um teste de tração em um espécime impresso 3D de forma a refletir a resistência anisotrópica causada pela ligação de camadas. Durante esse processo, verificamos que os espécimes, durante os testes, eram submetidos a variados esforços que inviabilizavam os testes, ou não conseguindo eliminar os efeitos já citados, escorregamento ou esmagamento do *grip*, como outros igualmente indesejados como rotação e flexão do espécime.

Uma possibilidade seria reduzir a dimensão da zona de *gauge* do espécime o que resultaria em valores menores de tração para o rompimento do espécime e também a força necessária sobre a zona de *grip* para manter o espécime sem escorregar e sem esmagar. Mas, como consequência teríamos uma área menor da zona de *grip* o que comprometeria o nosso objeto de estudo. A contrapartida, ou seja, aumentar o diâmetro da zona de *grip* do espécime dificulta o projeto da garra podendo introduzir outros problemas.

Entre as opções *grip*-amostras testadas, podemos citar por exemplo, amostras presas à máquina de testes com barras roscadas, com mandril, com perfis diferentes de zonas de *grip* e outras.

Para os espécimes cilíndricos (ASTM E8/E8M), foram testadas algumas geometrias diferentes de amostras e de garras, todas com a principal consideração de evitar tanto o escorregamento quanto a ruptura fora da zona de “*gauge*”. Espécimes de várias relações de dimensões entre “zona de *grip*” e “zona de *gauge*” foram impressos e testados na tentativa de determinar a melhor geometria de garra para esse tipo de amostras (**Figura 3.13**).

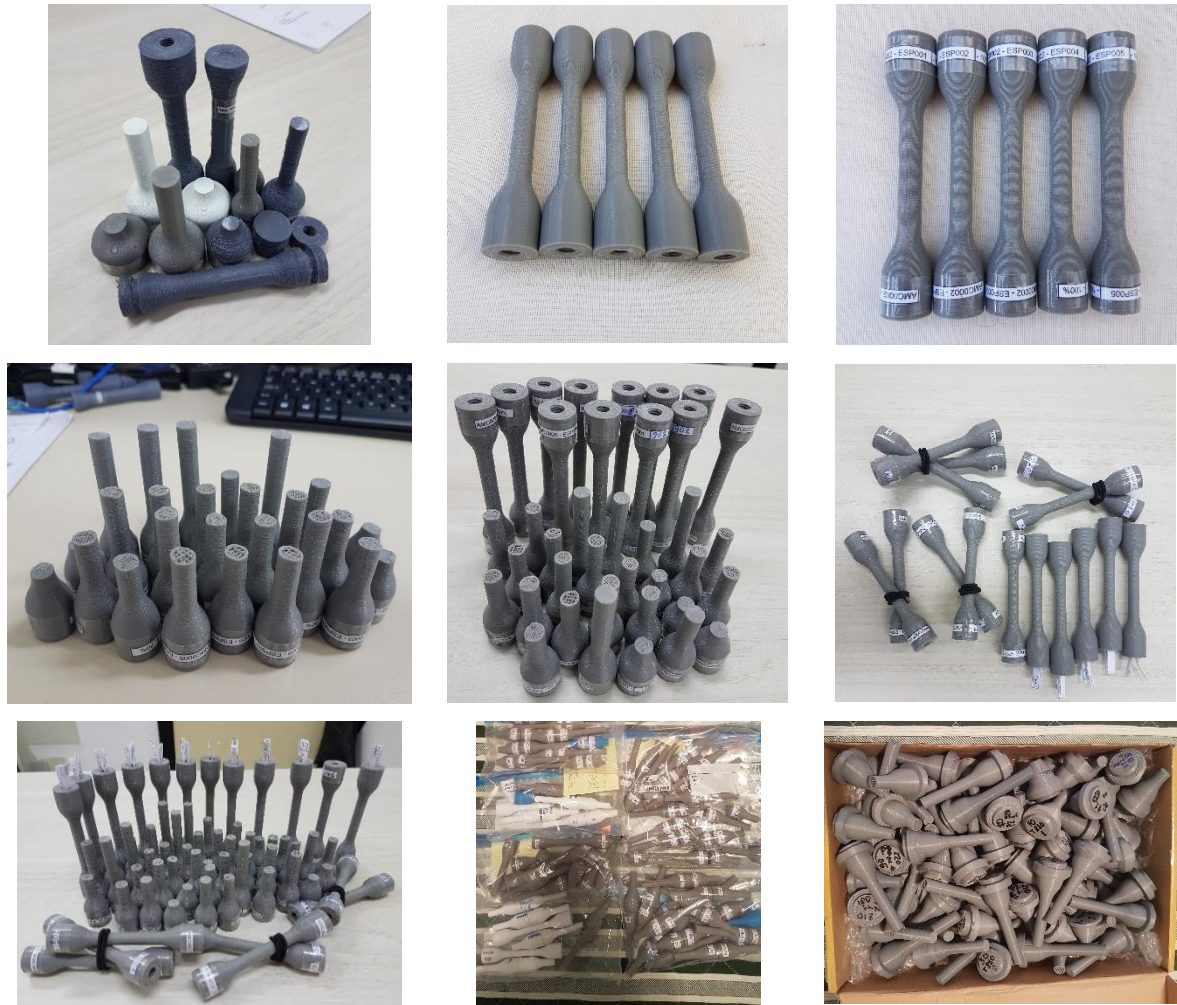


Figura 3.13: Diversos espécimes impressos e testados para as amostras de geometria cilíndrica.

Garras de tamanhos diferentes foram criadas de acordo com as dimensões e geometrias das amostras para a serem testadas. Em busca da melhor geometria para o espécime a ser usado na pesquisa, foram construídos diversos tipos de garras para testar cada uma das geometrias (**Figura 3.14**).



Figura 3.14: Algumas das garras construídas para acomodar uma amostra cilíndrica

Finalmente, para a geometria escolhida (**Figura 4.5**) foram construídas duas garras especiais mostradas na **Figura 3.15** e **Figura 3.16**.



Figura 3.15: Garra bipartida para a amostra DBCC usada na pesquisa.



Figura 3.16: Garra bipartida para a amostra DBCC usada na pesquisa.

3.1.4 O Extensômetro

Para se obter a precisão na geração das curvas de tensão-deformação, conforme exigido pelas normas ASTM, é absolutamente necessário usar um instrumento para medir o alongamento do comprimento da zona de “*gauge*” do corpo de prova, à medida que este é submetido a tração. Esse instrumento é chamado de extensômetro e o uso adequado dos mesmos, resulta em medições mais precisas, confiáveis e reprodutíveis do que as obtidas usando valores de extensão entre as garras (crosshead extension). Foram construídos diferentes tipos de extensômetros como LVDT, micrômetros digitais e outros. No entanto, o que funcionou melhor, foi um Tipo 1 (padrão ASTM E83) (ASTM-E83, 2010) construído usando um sensor “strain gage” retirado de uma pequena balança eletrônica de precisão (BROWN, 2002). A célula de carga e a placa de condicionamento de sinais HX711 foram acondicionadas em uma caixa impressa em impressora 3D. Um par de blocos de alumínio com lâminas presas na extremidade são conectados à célula de carga por um fio de aço rígido, como pode ser visto na **Figura 3.17**. As lâminas são encostadas na zona de “*gauge*” da amostra e apertadas por uma mola. Quando o corpo de prova é submetido a tração e a zona de “*gauge*” é esticada, um valor é medido no “strain gage” do extensômetro e traduzido em deslocamento.

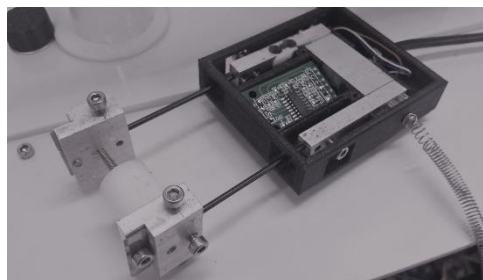


Figura 3.17: Extensômetro com “strain gage” e lâminas.

A curva de trabalho do extensômetro foi obtida usando um dispositivo de calibração construído usando um parafuso micrométrico com sensibilidade de 0,001mm (**Figura 3.18**). O comprimento dos fios de aço foi escolhido para obter uma deflexão máxima de 10 mm. No caso de teste de amostras com maiores valores de extensão esperados, esses fios podem ser estendidos para acomodar a nova situação. A calibração da curva do extensômetro foi aproximada por uma linha reta no intervalo de trabalho de acordo com a Equação (5),

$$e = 0,0125 \times m \quad (5)$$

Onde “m” é o valor em gramas lido na placa de condicionamento de sinal HX711 conectada à célula de carga do extensômetro e “e” é a extensão convertida em milímetro.

O coeficiente angular na Equação (5) é informado no arquivo de configuração do programa e pode ser editado toda vez que o extensômetro necessitar ser calibrado. Este extensômetro é utilizado para os ensaios em espécimes ASTM D638, o “*dogbone*” chato, usado para testar a resistência ao longo do plano de impressão XY da impressora 3D e ensaios de validação da máquina de testes. Nestes espécimes, a elongação em torno da tensão de ruptura pode chegar a 0.8mm.

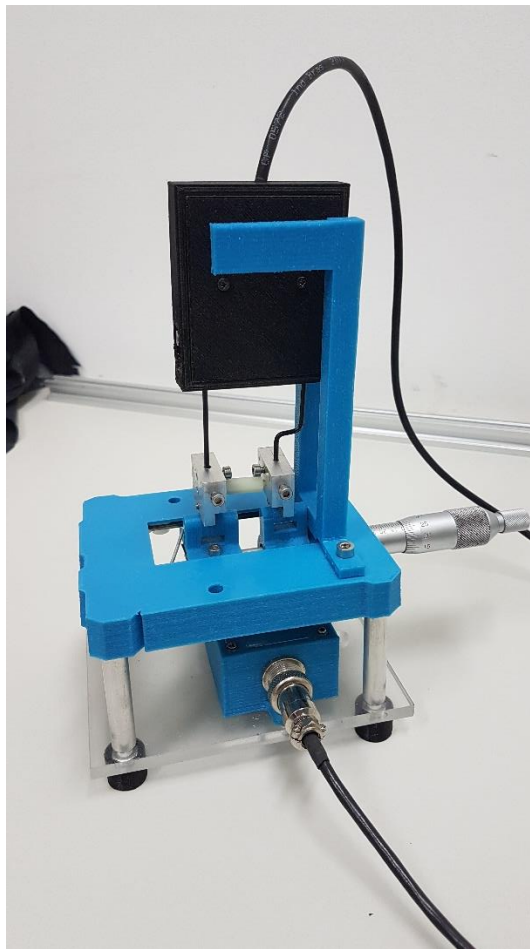


Figura 3.18: Aparelho para a calibração do extensômetro.

Entretanto, para as amostras cilíndricas, ASTM E8/E8M, usadas para testar a resistência no sentido vertical da impressão, principal objetivo deste trabalho, a extensão no ponto de ruptura é da ordem de centésimos de milímetro e, portanto, um extensômetro muito mais sensível se fez necessário. Assim, construímos um segundo extensômetro (**Figura 3.19**) com a mesma geometria, mas utilizando uma célula de carga muito mais sensível. Neste modelo substituímos o fio de aço por uma lâmina de aço, mantendo o braço inferior como uma barra rígida. Um outro calibrador foi construído especialmente para este extensômetro (**Figura 3.20**). A diferença entre os calibradores é basicamente quanto à forma de acoplar os extensômetros. Um hardware com um microcontrolador Arduino Nano e um firmware próprio permite a conexão com o computador para a aquisição dos dados da calibração.



Figura 3.19: Extensômetro mais sensível para os testes com as amostras desta pesquisa.



Figura 3.20: Calibrador para o extensômetro mais sensível.

3.1.5 Validação da Máquina de Testes

Para validar a precisão e a repetibilidade da nossa máquina, executamos testes idênticos com a nossa máquina e com uma Máquina Universal de Testes. Testamos um conjunto de amostras “dog-bone” ASTM-D638 impressas em PLA, com 100% de preenchimento transversal de 45 °. A máquina de teste comercial utilizada foi o INSTRON / EMIC DL2000 do Departamento de Construções e Estruturas da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia.

Não é prático comparar os dados diretamente medidos de carga e deformação, uma vez que esses valores não levam em conta as propriedades geométricas do espécime (ALVIN J FLINT, 1998). Esse problema pode ser resolvido convertendo os valores de carga e deformação em valores de tensão e de alongação, respectivamente. Os testes na máquina comercial DL2000 foram realizados sem um extensômetro e para efeito de comparação, temos que converter os valores de deformação em alongação usando uma distância estimada da extensão entre garra (crosshead extension). A **Figura 3.21** mostra um gráfico de tensão x alongação com quatro amostras testadas e a **Tabela 3.1** mostra um resumo dos valores importantes dos testes.

Embora não tenham sido realizadas correções para os valores iniciais, o que pode alterar levemente as curvas, podemos observar que os resultados para cada máquina têm uma excelente repetibilidade e entre os testes em diferentes máquinas os valores registrados são muito semelhantes, com diferenças de não mais que 1% para a tensão. A variação (em torno de 8%) entre os resultados obtidos para os valores de deformação é atribuída ao fato de que na máquina comercial foi usado o valor de extensão entre garras, por falta de um extensômetro.

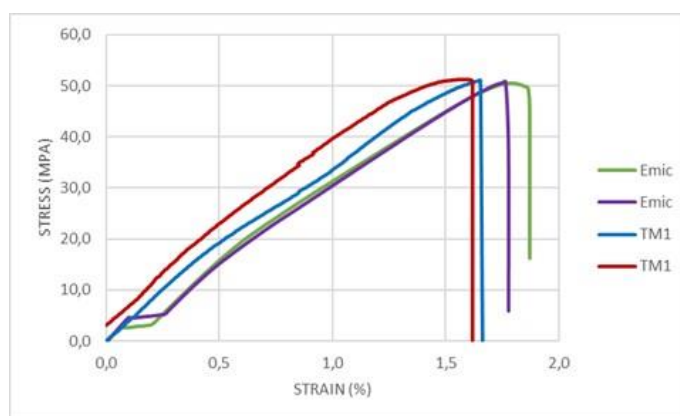


Figura 3.21: Curvas de tensão-deformação (*stress-strain*) comparando espécimes idênticos em duas máquinas.

Tabela 3.1 Valores de ruptura para os 4 espécimes testados

	Load at Break (kN)	Stress at Break (MPa)	Strain at Break (%)
TMI Specimen 1	2,47	50,6	1,61
TMI Specimen 2	2,48	51,0	1,66
Emic Specimen 1	2,46	50,5	1,79
Emic Specimen 2	2,47	50,8	1,76

A repetibilidade dos ensaios, com discrepância de 1%, pode ser vista no gráfico de tensão-deformação mostrado anteriormente para duas amostras Tipo I de acrílico cortadas a laser e testadas em nossa máquina. Vale ressaltar ainda que os valores obtidos estão em conformidade com aqueles observados na literatura estuda.

3.2 AS IMPRESSORAS 3D E O PROGRAMA DE FATIAMENTO

A impressora Makerbot Replicator 2 (**Figura 3.22**) foi escolhida para ser utilizada nesta pesquisa por ser a impressora desktop (não industrial) de melhor desempenho do mercado. Espécimes também foram impressos em outras impressoras construídas pelo autor (**Figura 3.23**) e daí a necessidade do uso de um programa capaz de fatiar arquivos STL para vários tipos de impressoras. Escolhemos o programa de fatiamento Simplify3D, que ao tempo do início desta pesquisa era o único programa capaz de gerar arquivos para o formato proprietário da impressora Makerbot Replicator 2 com total liberdade de ajuste de parâmetros. O programa Makerware, da Makerbot, não nos permitia um controle de todos os parâmetros requeridos. Atualmente, existem outros programas fatiadores, inclusive de código aberto (open source), com essa capacidade.

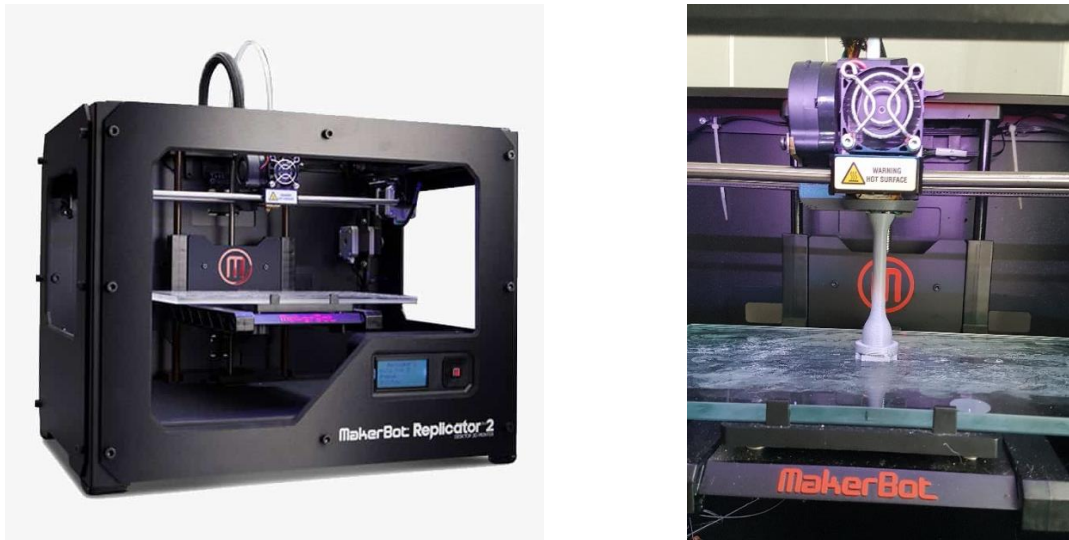


Figura 3.22: Impressora 3D comercial Makerbot Replicator 2

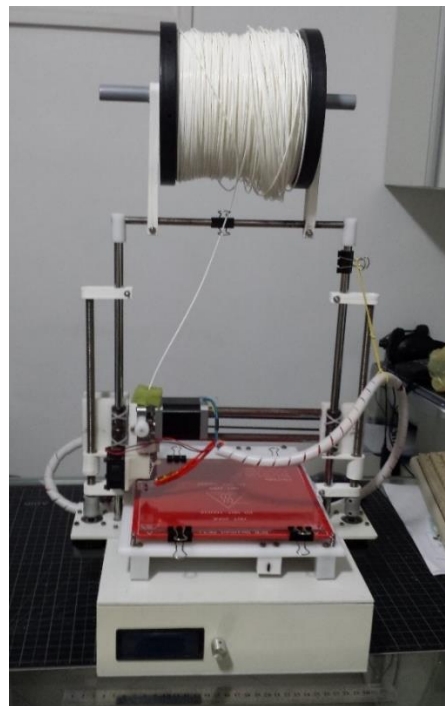


Figura 3.23: Impressora 3D projetada e construída pelo Autor.

3.3 EM BUSCA DA MELHOR GEOMETRIA PARA AS AMOSTRAS

Em função do exposto no capítulo 2, optamos por utilizar nesta pesquisa amostras de geometria cilíndrica para estudar as características mecânicas anisotrópicas de uma peça impressa em impressora 3D FDM quando sujeita a tração no sentido da deposição das camadas, por nos parecer mais adequado, principalmente em relação à uniformidade de deposição de

cada camada e a possibilidade de se ter uma área maior para estudar a contribuição do preenchimento (*infill*) na resistência à tração. Em uma amostra cilíndrica com 8mm de diâmetro na região do *gauge*, apesar de possuir um comprimento de perímetro menor do que os espécimes ASTM Tipo I e IV, possui uma área de preenchimento 44% maior para 1 perímetro.

Como a resistência no sentido vertical da impressão 3D é devido principalmente à área de fusão dos filamentos de uma camada depositada sobre a outra, geometrias verticais curvas estão sujeitas à deposição do tipo escadarias, onde existe uma diferença de posição entre o filamento de uma camada e o da camada seguinte (**Figura 2.11**). Em uma parede vertical, os filamentos depositados em uma camada assentam-se perfeitamente sobre o filamento depositado na camada anterior, gerando uma área de contato máxima, constante. Os interstícios (chamados de *air-gaps*) entre as camadas devido ao formato circular dos filamentos depositados podem ser considerados uniformes ao longo da camada, conforme vemos na (**Figura 2.10**).

Quando temos uma inclinação na parede, as camadas são depositadas ligeiramente deslocadas, provocando uma redução na área de ligação entre os filamentos de camadas sobrepostas. Isso se traduz em uma redução de resistência e, portanto, a introdução de uma zona de fraqueza que pode comprometer o teste de tração, com a quebra do espécime fora da zona de *gauge*. As geometrias das amostras de testes são projetadas de modo que a tensão aplicada sobre a zona de *gauge* seja maior do que a tensão aplicada sobre a zona de *grip*, garantindo que a tensão de rompimento seja determinada sobre a zona de *gauge*. Isso é verdade para espécimes isotrópicos e uniformes fabricados por métodos convencionais. Entretanto para espécimes impressos em 3D, o efeito “escadaria” pode reduzir a resistência na região de transição entre a zona de *gauge* e a zona de *grip*.

No caso de espécimes cilíndricos, como os propostos neste trabalho, existe uma dificuldade maior na confecção de garra apropriadas. A garra para espécimes tubular ou cilíndricos deve ser de tal forma que aplique uma força radial ao cilindro, com pelo menos três mandíbulas. As mandíbulas devem ter a interface conectada ao espécime, com uma curvatura semelhante à da seção reta do espécime ou cônicas para permitir um contato ao longo de uma linha e exercer uma força radial. Garra desse tipo são do tipo mandril. Entretanto, as áreas de contato dessas garras são difíceis de comportar uma superfície serrilhada para impedir o deslizamento do espécime.

Para determinar uma geometria cilíndrica para as nossas amostras, de forma a adequar um espécime impresso às especificações da ASTM para ensaios de tração, iniciamos com um

dog-bone cilíndrico e através de ensaios, identificamos as necessidades de alterações na geometria considerando a natureza anisotrópica da impressão camada a camada,

3.4 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS A SEREM ANALISADOS NA PESQUISA

A elaboração do plano de teste foi feita baseada na pergunta: “Quais os parâmetros do processo FDM mais afetam a propriedade de resistência entre as camadas?”

Considerando que os principais fatores (analisados na seção 2.6) que contribuem para a resistência à tração no sentido vertical de impressão de uma peça são o número de perímetros, o percentual de preenchimento, a altura da camada e a temperatura de extrusão, utilizaremos o método Taguchi de Delineamento de Experimento para determinar a importância desses parâmetros no processo.

3.4.1 Aplicação do DOE para determinar a contribuição dos parâmetros

Para o presente trabalho escolhemos inicialmente os parâmetros: número de perímetros, percentual de preenchimento, altura de camada, e temperatura de extrusão. Utilizando DOE, um conjunto de experimentos (ensaios de tração) foram realizados com o intuito de determinar quais os efetivos valores de importância de cada um desses parâmetros na resistência no sentido vertical de impressão das nossas amostras.

Na **Figura 3.24** vemos as variáveis de processo de entrada e saída (MISO) do FDM selecionadas para esta pesquisa.

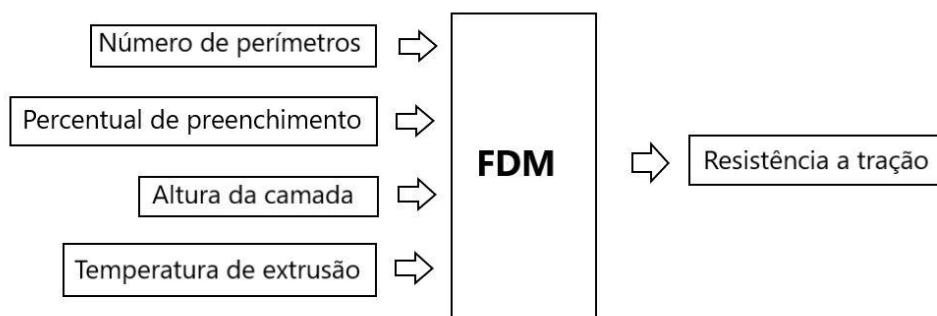


Figura 3.24: Variáveis do processo

O método Taguchi de Delineamento de Experimento possui as seguintes etapas básicas: (KARNA; SAHAI, 2012)

1. Identificação dos fatores (parâmetros do processo);
2. Determinação dos níveis (valore de intervalo dos parâmetros);
3. Escolha da Matriz Ortogonal;
4. Planejamento e Realização dos experimentos;

A análise dos resultados é feita nas seguintes etapas:

1. Aplicando ANOVA para determinar a significância e percentuais de contribuição parâmetros para a característica estudada;
2. Selecionando o objetivo da análise (Maior é melhor, Menor é melhor, Variação mínima)
3. Analisando gráficos de “main effect”;
4. Analisando gráficos de contribuição dos fatores;

3.5 DETERMINAÇÃO DA ÁREA TOTAL DE CONTATO

A primeira fase de ensaios visou verificar a dependência da resistência a tração com os parâmetros de entrada listados acima. Usando o método Taguchi de Delineamento de Experimentos (DOE) com um arranjo ortogonal L9 para o modelo de 4 fatores (parâmetros de entrada) e 3 níveis (valores de referência).

Assim, iniciamos o nosso estudo analisando a importância desses parâmetros para a resistência a tração no sentido de acamamento das camadas. A **Tabela 3.2** mostra os níveis para os parâmetros inicialmente selecionados de forma a construir o arranjo ortogonal para o DOE.

Tabela 3.2: Níveis dos parâmetros selecionados

	Parâmetro	Níveis		
		A	B	C
1	Perímetros	1	2	3
2	Preenchimento (%)	0	50	100
3	Altura da camada (mm)	0,20	0,25	0,30
4	Temperatura (°C)	200	210	220

No sentido da deposição, os perímetros de uma peça formam a ligação mais importante entre as camadas, especialmente em um acamamento 100% vertical. Quanto maior a quantidade de perímetros maior a ligação. O percentual de preenchimento contribui pouco para a resistência vertical se for feito em ângulos diferentes em camadas subsequentes, **Figura 3.25**, apesar de contribuir muito para a resistência estrutural à compressão e sustentação das camadas de fechamento da peça impressa. Entretanto, um preenchimento linear com um único ângulo, não só realiza a mesma contribuição do preenchimento cruzado como adiciona uma área de contato mais ampla entre as camadas (**Figura 3.26**).



Figura 3.25: Foto ampliada mostrando como se dá o acamamento no preenchimento cruzado



Figura 3.26: Foto de um corte transversal da região de *gauge* de um espécime, mostrando o acamamento linear do preenchimento com o mesmo ângulo em todas as camadas.

Assim, considerando que os parâmetros Perímetro e Percentual de Preenchimento contribuem os dois para a área de contato entre as camadas e efetivamente é essa área que deve, a princípio, ter a maior contribuição para a resistência a tração, vamos substituir esses dois parâmetros por apenas um parâmetro que reflita a Área Total de contato entre as camadas e que pode ser facilmente determinado pelas técnicas descritas adiante. Desta forma, a tabela de parâmetros e níveis passa a ser a **Tabela 3.3**.

A área de contato é função da linha plana (LP) que está relacionada com o parâmetro Largura da Extrusão - EW (Extrusion Width) mas relacionado também (nos programas de fatiamento) com a espessura da camada e a temperatura, devido ao processo de difusão e fundição do plástico depositado em cada camada com a camada anterior.

Tabela 3.3: Parâmetros e seus níveis

	Parâmetro	Níveis		
		A	B	C
A	Área total de contato (mm ²)	10,58	29,06	48,6
B	Altura da camada (mm)	0,2	0,25	0,3
C	Temperatura (°C)	200	210	220

Os limites inferior e superior, bem como o valor central foi determinado considerando as áreas mínima, máxima e média da combinação entre 1, 2 e 3 perímetros e percentuais de preenchimento variando de 0 a 100%.

3.5.1 A ligação entre as camadas.

Para a determinação da área efetiva de contato entre as camadas, temos que determinar o comprimento total dos fios depositados e a largura do contato entre os fios, chamada de Linha Plana (LP), tanto para os perímetros quanto para o preenchimento linear.

O comprimento do fio depositado depende do caminho percorrido pelo bico extrusor em cada camada. Para obtê-lo, um programa em .NET C# foi criado pelo autor para interpretar as coordenadas do arquivo .gcode enviados para a impressora 3D.

A Linha Plana foi determinada cortando-se transversalmente os espécimes ensaiados e medida em imagem de microscópio usando um software proprietário.

3.6 RELAÇÃO ENTRE PERÍMETRO E O PREENCHIMENTO

A área efetiva de contato entre as camadas é diferente para os perímetros e para o preenchimento. Apesar de considerarmos a Área Total de contato nesta pesquisa, conhecer a relação entre as áreas de contato dos perímetros e do preenchimento tem importância na especificação desses parâmetros no fatiamento de uma peça, tanto para a resistência quanto para o tempo de impressão. Mesmo que as relações geométricas estudada aqui envolva apenas uma camada cilíndrica, pode ser facilmente determinada para uma seção reta qualquer e extrapolada. Essa relação foi realizada utilizando as informações coletadas no item anterior.

3.7 DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE A TENSÃO DE ROMPIMENTO E OS PARÂMETROS ANALISADOS

Nesta fase da pesquisa, em busca de determinar uma equação que descreva melhor a resistência devido à anisotropia no sentido do acamamento do processo FDM, realizamos ensaios de amostras com diferente número de perímetros e diferentes percentuais de preenchimento, para 3 valores de temperatura de extrusão e três alturas de camada. A partir

desses dados identificamos os processos subjacentes responsáveis pela resistência anisotrópica em faixas diferentes de domínio dos parâmetros. Uma regressão linear multivariada foi então realizada, no software Wolfram Mathematica[®] para a obtenção da relação entre Tensão e os parâmetros analisados.

Capítulo

4

RESULTADOS

Este capítulo apresenta a nova geometria da amostra, a relação entre os parâmetros analisados e a metodologia sugerida para a inclusão destes em projetos de peças a serem impressas em 3D.

4.1 A DETERMINAÇÃO DA GEOMETRIA DAS AMOSTRAS

A transição entre a zona de *grip* e a zona de *gauge* na amostra deve ser a mais suave possível, sem criar pontos de fraqueza súbitos. Nas geometrias ASTM essa transição é geralmente muito acentuada o que nos levou a projetar uma geometria com duas curvaturas (a exemplo do ASTM tipo IV), mas com a mesma curvatura tanto na curva interna quanto externa. Além disso, as curvas (arcos de círculo) são tangentes entre si no encontro com as zonas de *grip* e *gauge* (todas as derivadas são contínuas, garantindo um deslocamento mais uniforme entre as camadas, conforme a **Figura 4.1** (a e b)).

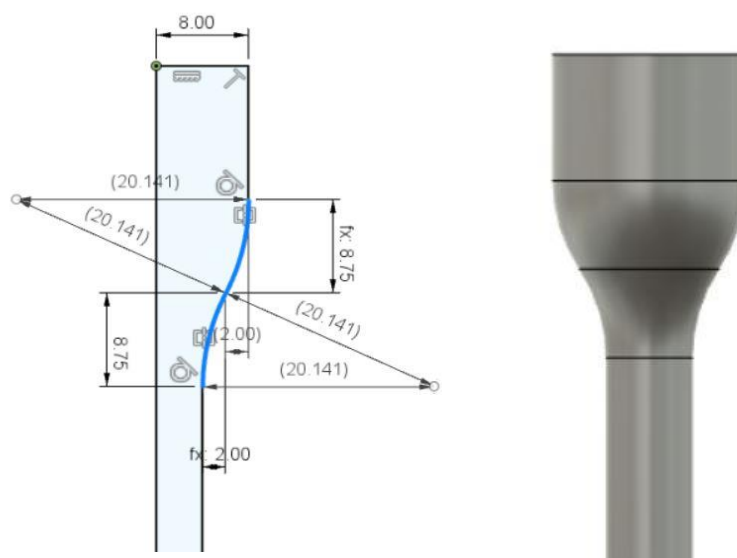


Figura 4.1: a) geometria parcial da seção da amostra cilíndrica com transição suave entre as zonas de gripe e *gauge*. B) Imagem parcial da amostra gerada pela rotação da geometria em a)

Em uma peça impressa, o deslocamento horizontal das camadas (efeito escada) nas superfícies curvas verticais, associado com a espessura da camada, também é responsável pela aparência e pela precisão dimensional (GÓRSKI; KUCZKO; WICHNIAREK, 2013).

Apesar de que a amostra cilíndrica gerada pela geometria da **Figura 4.1** possuir uma zona de transição mais suave, minimizando os problemas associados à deposição em “escadaria”, a forma de prender os espécimes na máquina de teste, com um grip que aperte radialmente a zona de grip, ainda sujeita os espécimes ao esmagamento e ao escorregamento. Uma tentativa foi realizada com um grip que envolvesse o espécime na região de transição (**Figura 4.2**) mas devido a variações na precisão dimensional das peças impressas e no desenho do grip, o casamento entre grip/espécime não acontece perfeitamente, fazendo com que a força resultante aplicada não fique alinhada com o eixo do espécime, acarretando flexões no espécime, que foram observadas principalmente no início do teste e refletiam drasticamente no comportamento das medidas de alongação pelo extensômetro utilizado.

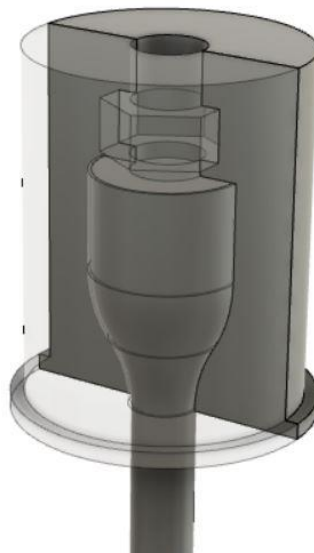


Figura 4.2: Grip envolvendo a região de transição de um espécime cilíndrico convencional.

Outras geometrias de grip foram testadas (garras foram fabricadas, espécimes foram impressos e ensaiados na máquina de tração)

A solução encontrada foi adotar uma geometria para a amostra adaptando a geometria de grip conhecida como “*split collar*”, acrescentando na amostra um colar. Essa geometria está mostrada na **Figura 4.3** e **Figura 4.4**, junto com o projeto da garra especializada.



Figura 4.3: Geometria do espécime cilíndrico projetado com "split-collar" (topo do espécime).

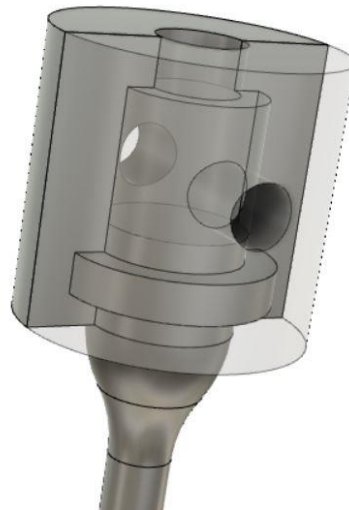


Figura 4.4: Geometria do espécime cilíndrico projetado com "split-collar" (base do espécime).

Entretanto, para imprimir o colar seria necessário acrescentar suportes à impressão o que nos conduziria de volta ao problema da flexão uma vez que a retirada dos suportes dificilmente nos deixa com uma superfície perfeitamente lisa. Por isso, incluímos no design do perfil da amostra um cone entre a zona de *grip* e o colar. Apesar de que nessa situação a força exercida pelo *grip* continuar sendo radial, a construção do *grip* com um cone com uma superfície lisa permite um casamento uniforme entre o espécime e o *grip*, sem causar flexão no espécime. A força resultante fica, portanto, alinhada com o eixo do espécime. A parte inferior da amostra foi deixada sem o cone por possuir na parte de cima do colar (a superfície que recebe o esforço) um plano horizontal liso no processo de impressão do espécime. Em parte, também

porque é mais fácil fabricar uma garra com o plano de contato horizontal. Na **Figura 4.5** temos o projeto da geometria da amostra utilizada nesta pesquisa para os testes de tração.

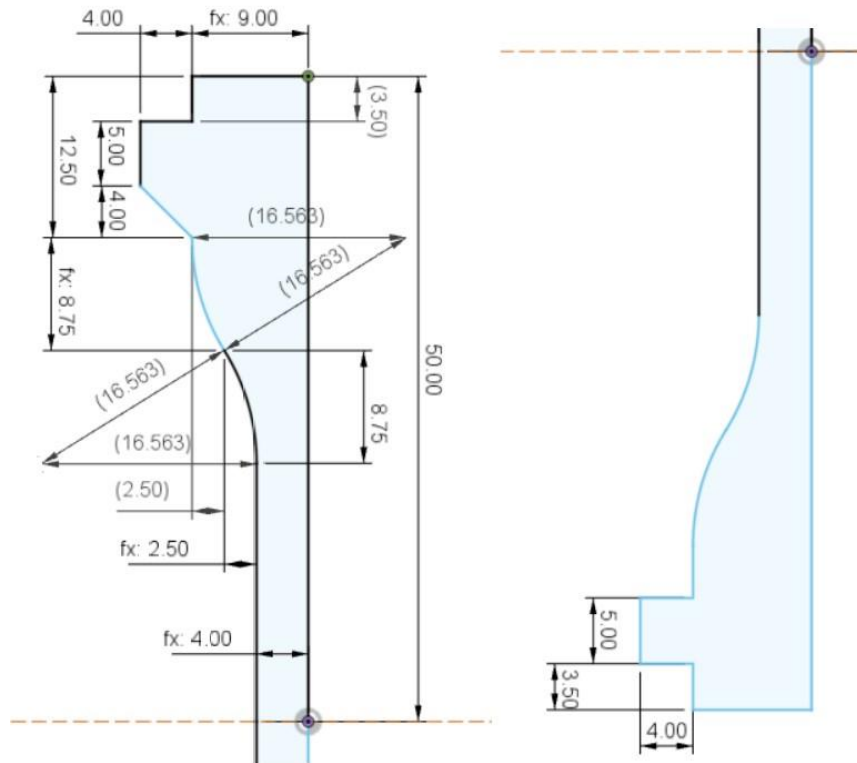


Figura 4.5: Geometria das partes superior e inferior da amostra projetada para essa pesquisa.

4.1.1 A amostra

A **Figura 4.6** mostra a imagem renderizada da amostra utilizada para gerar todos os espécimes utilizados nos ensaios de tração desta pesquisa, uma análise de tensão realizada no programa SOLIDWORKS e um espécime impresso. A análise de tensão demonstra que no ensaio de tração, a maior força vai estar concentrada na zona de *gauge*, conforme desejado.

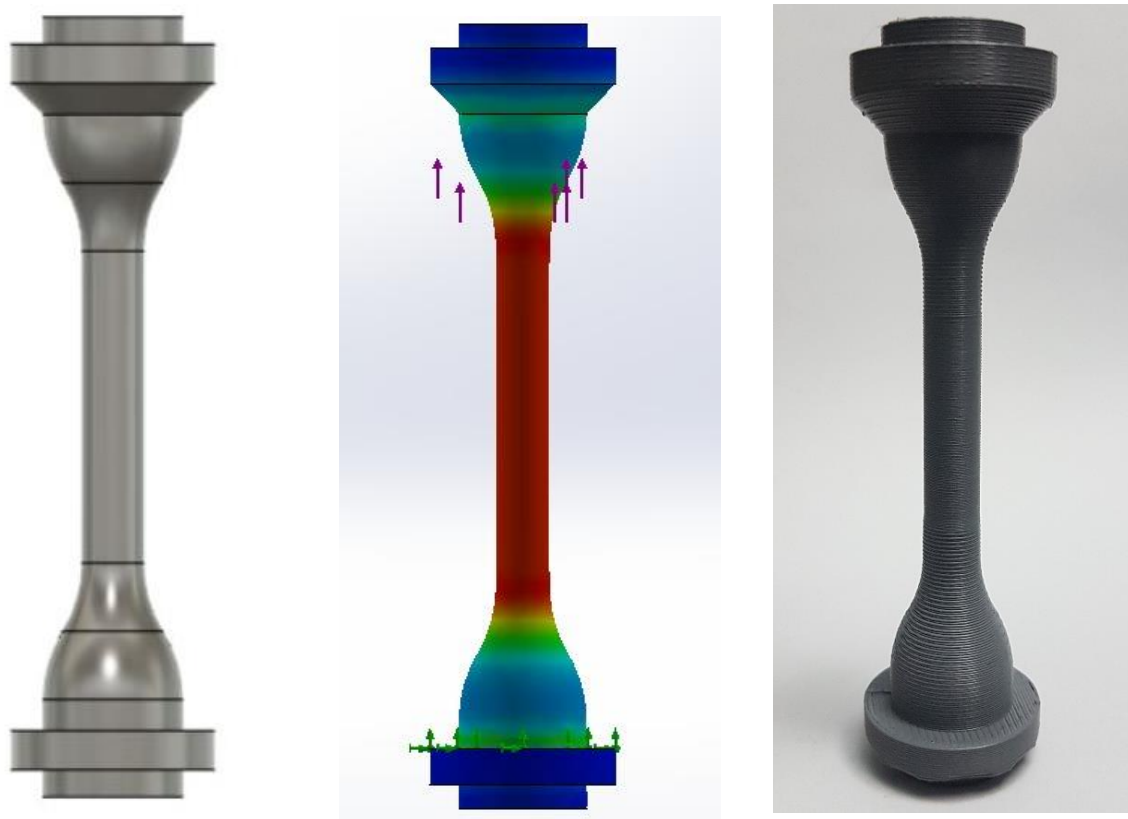


Figura 4.6: Imagem renderizada da amostra cilíndrica utilizada nesta pesquisa, uma análise de tensão e um espécime impresso

Os espécimes foram impressos principalmente em uma impressora Makerbot Replicator 2. Os arquivos foram desenhados com software Fusion 360 da Autodesk, e o arquivo STL fatiado no software Simplify3D e exportados em arquivos x3g, padrão da Makerbot. O Simplify3D também grava o mesmo arquivo em formato gcode. Apesar de o arquivo para a Makerbot ser um formato proprietário, o arquivo gcode nos permite conhecer todos os movimentos que o cabeçote de impressão está realizando. Um software feito pelo autor em C#.NET permitiu a extração de informações do arquivo gcode para auxiliar os cálculos e interpretação dos dados obtidos com os ensaios de tração.

Para facilitar a identificação dos espécimes, a seguinte nomenclatura foi utilizada DBCC-FxxPxCxxGxxTxxx onde:

- DBCC = Dog-Bone Cilíndrico com Cabeça;
- F = Percentual de Preenchimento;
- P = Número de Perímetro;
- C = Altura da Camada;

- G = Ângulo do Preenchimento;
- T = Temperatura de Extrusão.

O fatiamento foi realizado em múltiplos processos no Simplify3D (APÊNDICE IV), dividindo o espécime em 5 zonas (**Figura 4.7**): A zona *gauge*, as zonas de transição (duas) e as zonas de grip (duas). A zona de *gauge*, objeto do estudo dos ensaios de tração, tiveram seus parâmetros variados de acordo com o plano de testes. As zonas de transição e de grip, de modo a garantir a maior resistência possível nestas regiões, foram impressas com 3 ou mais perímetros e 100% de preenchimento com ângulos de $-45/45$ graus em camadas alternadas. Assim, a tensão de rompimento durante o ensaio de tração acontece predominantemente na zona de *gauge* conforme determinado pelo ASTM D638 (ASTM-D634-14, 2016)



Figura 4.7: Processos do Simplify3D para o fatiamento da amostra.

4.2 DETERMINAÇÃO DA ÁREA TOTAL DE CONTATO

Como é esperado que a resistência de uma peça no sentido da deposição das camadas seja devida principalmente à área de contato entre os fios depositados, os preenchimentos lineares ou em grid, repetido em cada camada, apresentam as melhores opções para o estudo

comparativo entre as contribuições dos perímetros e do preenchimento na resistência das peças no sentido Z. Os padrões de preenchimentos que apresentam deslocamento entre camadas ou preenchimento cruzado entre camadas possuem pontos de contato reduzidos o que enfraquece a ligação entre as camadas reduzindo a resistência (**Figura 3.25**).

No início da pesquisa, utilizamos amostras com padrão em grid que pode aumentar significativamente a resistência vertical a tração, do espécime, mas esse padrão não só consome mais tempo e material, como dificulta o cálculo da região de contato entre as camadas. Passamos a adotar o preenchimento linear, com apenas um ângulo (**Figura 4.8**). De qualquer modo, a cobertura do preenchimento em grid também pode ser alcançada pelo preenchimento linear.

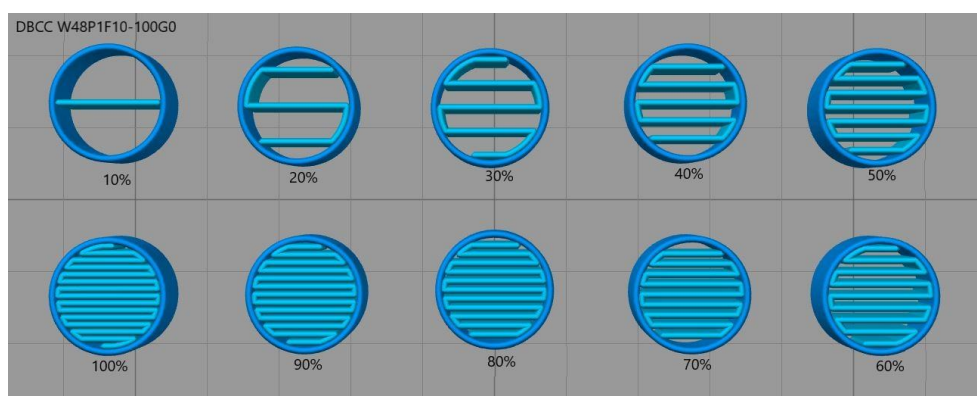


Figura 4.8: Os diversos percentuais e preenchimento linear usados nesta pesquisa.

Os valores do parâmetro de preenchimento nos softwares de fatiamento, a exemplo do fatiador utilizado nesta pesquisa, são geralmente expressos em porcentagem. Um preenchimento de 10%, por exemplo, implicaria no fatiador codificar um caminho para a deposição do fio pelo extrusor de modo a preencher a área interna de cada camada com o padrão solicitado de preenchimento tal que 10% da área interna da camada seja preenchida com plástico. Entretanto, nem todos os valores de percentuais são possíveis de se obter, especialmente quando temos áreas pequenas como na região de *gauge* das nossas amostras. Isso se deve ao fato de que o fatiador deve escolher uma deposição de preenchimento que inicie e termine conectado na parede interna da área a ser preenchida. Por exemplo, vemos na **Figura 4.8**, que o preenchimento de 10% gera um filamento que atravessa o diâmetro da área a ser preenchida, mas não representa realmente 10% área interna. Colocar duas linhas de

preenchimento criaria um preenchimento percentual maior do que 10% por uma diferença maior do que somente uma linha. Obviamente, quanto maior a área existente em uma peça para preenchimento maior vai ser a aproximação do valor solicitado e menor o erro do fatiador. Assim, apesar de termos gerado nossos espécimes com valores inteiros de preenchimento percentual (a exemplo de outros trabalhos referenciados), vimos a necessidade de calcular os valores percentuais efetivamente preenchidos pelo fatiador. A **Figura 4.9** mostra os percentuais de preenchimento reais das amostras enquanto a **Figura 4.10** mostra esses mesmos preenchimentos em espécimes impressos.

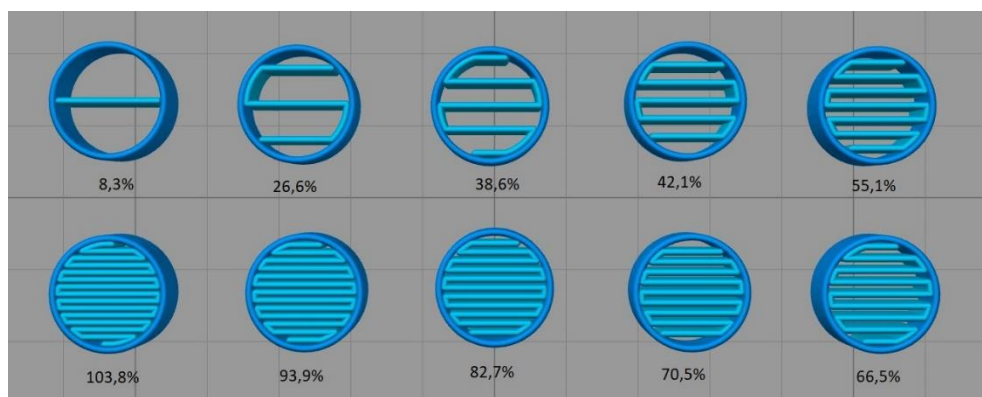


Figura 4.9: Os percentuais reais para o preenchimento linear usados nesta pesquisa.



Figura 4.10: Percentuais de preenchimento reais nos espécimes impressos.

O cálculo dos percentuais reais é feito considerando os parâmetros largura de extrusão (EW), altura da camada, e diâmetro do bico extrusor através da fórmula obtida por consulta ao suporte do fabricante do software fatiador Sismplify3D, considerando a geometria do *gauge* da nossa amostra.

$$\%Real = \frac{4 \times n \times L \times EW}{\pi \times D^2} \quad (6)$$

Onde:

- n = número de extrusão por camada (no nosso caso 1, linear com apenas um ângulo de extrusão = 0°);
- L = comprimento do fio depositado no preenchimento;
- EW = o parâmetro largura de extrusão (normalmente 1,2 do diâmetro do bico extrusor);
- D = diâmetro da área de preenchimento.

A dificuldade está em determinar o valor do comprimento do fio depositado, L . Este valor foi então obtido do arquivo *gcode* gerado pelo fatiador para os diferentes valores de percentual de preenchimento. Um programa criado em .NET C# pelo autor lê o arquivo *gcode* gerado para o espécime e calcula o comprimento dos movimentos do cabeçote de impressão para executar o preenchimento. Estes valores são de suma importância para determinar não só os percentuais de preenchimento reais, mas principalmente para determinar, como veremos adiante, a área efetiva de fusão entre as camadas, necessária para calcular o valor correto da Tensão.

4.3 A LIGAÇÃO ENTRE AS CAMADAS.

Ao contrário dos espécimes convencionais produzidos por métodos como injeção, moldagem, prensagem ou fresagem, que geralmente são sólidos e isotrópicos, espécimes produzidos por FDM dificilmente são completamente sólidos e homogêneos, resultando em uma anisotropia natural no sentido da deposição das camadas. Os filamentos extrudados ao deixar o bico extrusor são comprimidos contra as camadas inferiores, fluindo lateralmente na

direção transversa à velocidade do extrusor, formando uma seção reta ovalada, como representado na **Figura 4.11**. As extremidades dessa seção reta são assumidas circulares porque as tensões superficiais devem agir de modo a minimizar a área superficial (COOGAN; KAZMER, 2019).

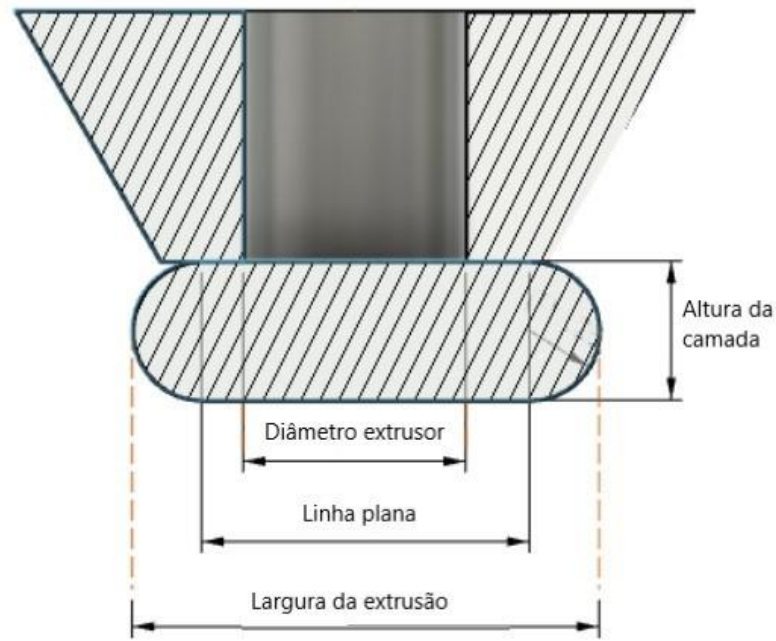


Figura 4.11: Geometria da extrusão em uma impressora 3D FFF.

A largura da extrusão é um parâmetro do programa de fatiamento e ele define a largura com que o fio resultante da extrusão vai ficar. Define também a separação entre os centros de filamentos depositados lado a lado, a exemplo dos perímetros. A quantidade de plástico extrudado pelo extrusor é calculada para produzir um fio esmagado entre as camadas de forma a aumentar a “linha plana” que define a área de adesão entre as camadas (**Figura 4.12**).

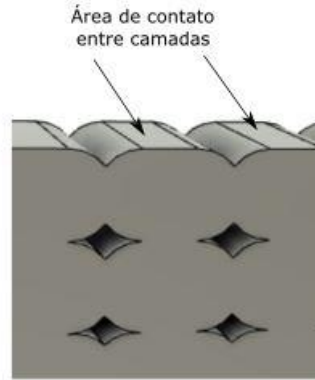


Figura 4.12: Corte indicando a área de contato entre as camadas, onde uma dimensão é a Linha Plana.

Teoricamente, a área da seção reta do fio depositado é calculada pela fórmula:

$$A = A_{\text{retangulo}} + 2A_{\text{semi-circulo}} = (EW - H) * H + \pi \left(\frac{H}{2}\right)^2 \quad (7)$$

Onde EW é a Largura da extrusão, e H a altura da camada. A Linha Plana (LP), a largura da área plana que efetivamente liga as camadas, é considerada ser:

$$LP = EW - H \quad (8)$$

que representa o retângulo sem os semicírculos laterais. A área de contato entra as camadas é então:

$$A_c = LP \times L \quad (9)$$

Onde L é o comprimento total do fio depositado em toda a camada. Por exemplo, para os perímetros do círculo que representa a região de *gauge* das nossas amostras, podemos considerar a área de contato teórica como sendo:

$$A_c = \sum_{n=1}^{NP} \pi \times (D - (2n - 1) \times \left(\frac{EW}{2}\right)) \times LP \quad (10)$$

onde D é o diâmetro da região de *gauge* e NP o índice do perímetro de fora para dentro.

Outros parâmetros, como por exemplo o Multiplicador de Extrusão, podem forçar mais plástico a ser extrudado, de forma a aumentar o contato lateral entre fios (perímetros por exemplo) reduzindo o espaço vazio entre os fios depositados (*air-gap*) (TRONVOLL; WELO; ELVERUM, 2018). A priori, entretanto, considerando os valores default utilizados na maioria dos fatiadores, a fórmula acima para a LP é mais apropriada.

Os fatiadores geralmente permitem que o valor da largura de extrusão, o EW, seja especificada diferentemente para os perímetros e para o preenchimento. Um preenchimento com um EW menor, gastará menos plástico e fará o tempo de impressão diminuir. Isso pode ser particularmente útil quando o preenchimento da peça sendo impressa for principalmente para sustentação de camadas superiores ou se a peça não vai sofrer trações no eixo Z. No caso desta pesquisa, mantivemos esse parâmetro igual tanto para os perímetros quanto para o preenchimento.

Das fórmulas acima podemos ver que o valor da área de contato entre as camadas é função da Linha Plana, que depende principalmente dos parâmetros largura de extrusão EW e da altura da camada H. Na **Figura 4.13**, temos a representação de como a Linha Plana (e consequentemente a área de contato entre as camadas) varia com a altura da camada, e valores diferentes de EW para um mesmo diâmetro de bico extrusor (DE) de 0,4 mm. Na **Figura 4.13(a)** temos o pior caso de adesão entre as camadas. Um bico de diâmetro 0,4 mm, uma altura de camada H=0,40 mm e Largura de Extrusão EW=0,40 mm. Neste caso, o filamento depositado é um cilindro e o contato entre as camadas é mínimo, gerando uma ligação bem pobre entre as camadas. Na **Figura 4.13 (b)** a altura da camada é menor que o diâmetro do bico extrusor, mas a Largura de Extrusão foi mantida igual ao valor recomendado de 1,2 do diâmetro do bico (EW=0,48). Como resultado, o filamento é ligeiramente espremido sobre a camada inferior, formando uma área de contato entre as camadas que ainda é menor do que o diâmetro do bico. Essa é uma situação difícil de se observar na prática uma vez que ao espremer o filamento que está saindo do bico contra a camada inferior, o bico e o fio sendo extrudado cria uma superfície cuja largura (Linha Plana) é pelo menos do mesmo do diâmetro do bico aproximando-se da situação em (c). Na **Figura 4.13 (d)**, temos uma situação hipotética onde a

relação entre a altura da camada e a Largura de Extrusão resulta em uma linha de contato maior do que o diâmetro do bico.

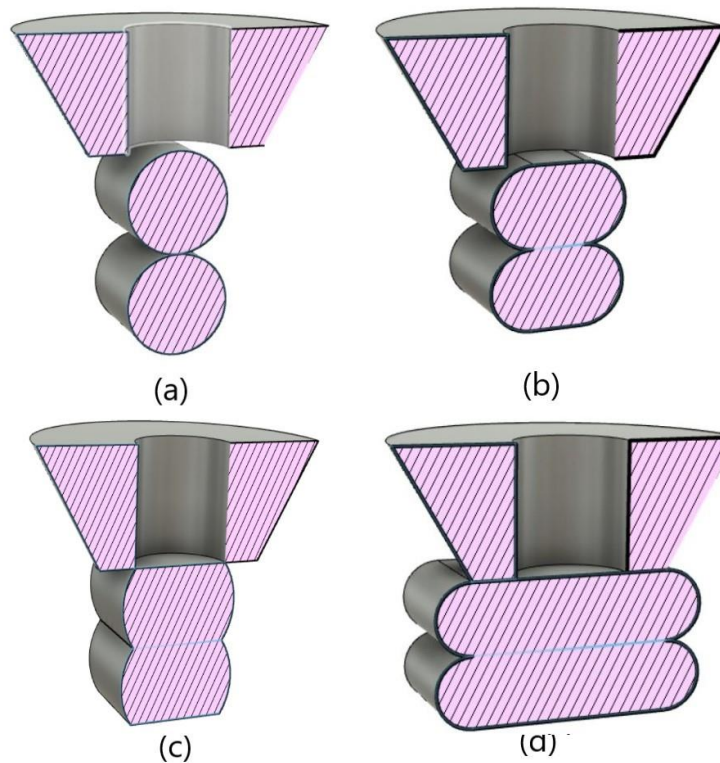


Figura 4.13: (a) $EW = 0,40\text{mm}$, $H = 0,40\text{mm}$; (b) $EW = 0,48\text{mm}$, $H = 0,30\text{mm}$; (c) $LP = \text{diâmetro do bico}$; (d) $LP > \text{diâmetro do bico}$.

Na **Tabela 4.1** temos vários valores de Linha Plana calculado (valor teórico) em função de EW e H , para um bico de diâmetro $0,4\text{mm}$. Podemos ver que quanto menor a altura da camada e quanto maior for o EW , maior o valor da Linha Plana e conseqüentemente maior a área de contato entre as camadas.

Tabela 4.1: Valores calculados de Linha Plana (em mm) para diferentes valores de EW (largura da extrusão) e H (altura da camada).

		Altura camada (mm)		
		0,30	0,20	0,10
EW (mm)	0,48	0,18	0,28	0,38
	0,60	0,30	0,40	0,50
	0,80	0,50	0,60	0,70

A variação desses parâmetros, não só tem influência na resistência da ligação entre as camadas como também na precisão dimensional da peça (GÓRSKI; KUCZKO; WICHNIAREK, 2013)(RAJENDRSINH DARBAR & PRAJESH M. PATEL, 2017).

No ensaio de tração de espécimes obtido pelos métodos convencionais de fabricação, esses são geralmente 100% sólidos e isotrópicos uma vez que o objetivo é determinar o comportamento de um determinado material quando submetido a esforços. A *Tensão (Stress)* é calculado dividindo-se a tração aplicada pela área da região de *gauge* (HYLTON, 2004), Equação (2).

Entretanto, quando se trata de uma peça construído pelo processo de FDM em uma impressora 3D, geralmente oca ou com sua área interna parcialmente preenchida, queremos determinar não a resistência a tração do plástico, mas sim das ligações entre as camadas depositadas uma sobre as outras. Assim, a *tensão* deve ser calculada dividindo-se a força aplicada pela área efetiva de ligação entre as camadas, tanto dos perímetros quanto dos fios depositados para o preenchimento. As expressões (9) e (10) definidas pelo modelo geométrico, é apenas uma forma de se determinar a área de contato. Outros modelos como, geométrico retangular com difusão de calor (THOMAS; FODRIGUEZ, 2000), modelo analítico de transferência de calor por difusão de massa (WOOL; O'CONNOR, 1981) e experimentos de sinterização (BELLEHUMEUR et al., 2004; LI et al., 2015) sugerem formas analíticas de estudar a ligação entre as camadas e o processo e fusão entre camadas de polímeros.

Nesta pesquisa, nos atemos ao modelo geométrico acima, de forma a minimizar as variáveis envolvidas. Entretanto, a área de contato calculada usando os valores de Linha Plana da **Tabela 4.1** geralmente diferem dos valores reais obtidos após a impressão das camadas. Seriam necessários ajustes de uma série de outros parâmetros no software fatiador para obter a espessura de perímetro dentro da precisão esperada, o que resultaria também na inclusão de outras variáveis, limitando a abrangência da pesquisa. Apenas consideramos parâmetros comumente utilizados na preparação de uma peça a ser impressa.

Assim, para determinar o valor real da tensão sobre os nossos espécimes testados foi necessário calcular a área efetiva de ligação entre as camadas. Tanto o valor LP quanto o valor L na equação (9) foram determinados utilizando os seguintes métodos:

4.3.1 Determinação da Linha Plana

Para a determinação da Linha Plana LP, que representa a dimensão transversal do contato efetivo entre os filamentos de duas camadas sobrepostas alinhadas verticalmente, com ângulo de inclinação igual a zero (**Figura 4.14**), usamos um processo fotográfico associado a um software de medidas em imagens.

Utilizando um microscópio digital, fotografamos cortes transversais feitos nos espécimes impressos (**Figura 4.15**) e utilizamos o software ImageJ (NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH, [s.d.]) para medir a linha de contato entre as camadas.

As medidas foram feitas tanto em fotografias de cortes em espécimes após ensaios, como também em paredes projetadas e impressas com o objetivo inicial de se testar o método de corte (**Figura 4.16**). Vários métodos, como guilhotina, facas, serras, tesouras diversas e lâminas foram testados na tentativa de se obter um corte o mais limpo possível, introduzindo o menor esforço mecânico e térmico possível à região cortada. O método que melhor atendeu às nossas necessidades foi a utilização de uma lâmina muito fina, com 0,07mm de espessura com uma força aplicada transversalmente ao corte e em tempo muito curto.



Figura 4.14: Detalhe de um corte num espécime para a medida da Linha Plana.

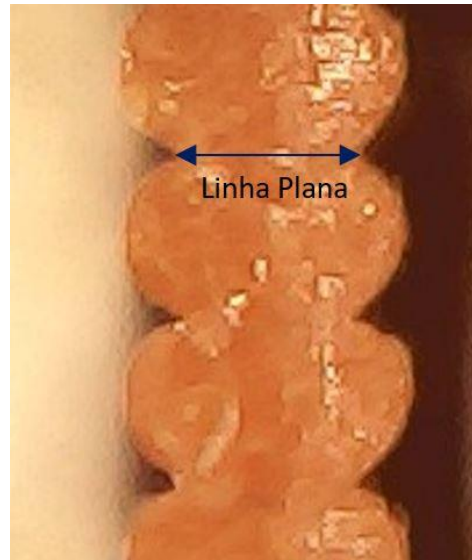


Figura 4.15: Foto ampliada mostrando a determinação da Linha Plana no ImageJ.

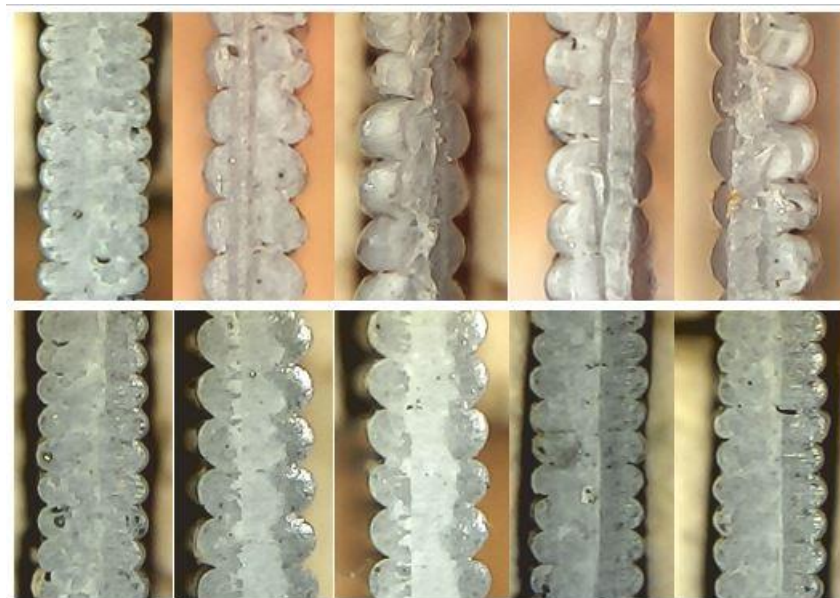


Figura 4.16: Imagens ampliadas de diversos cortes do acamamento vertical em espécimes usadas no ImageJ para a determinação da Linha Plana.

Para cada combinação de parâmetros (Espessura da camada, largura de extrusão e temperatura) foram realizadas diferentes imagens, em cortes diferentes, com 20+ medidas (**Figura 4.15**). Calculou-se então o valor médio e o desvio padrão para as medidas de Linha Plana. Os resultados estão sumarizados na **Tabela 4.2**. Medidas da Linha Plana também foram realizadas em paredes verticais impressas em diferentes impressoras, com diferentes marcas de PLA e softwares fatiadores e mostraram-se compatíveis com as medidas realizadas nos nossos

espécimes. Entretanto, como a Linha Plana é uma grandeza necessária para calcular a Tensão de Ruptura dos espécimes submetidos a ensaio de tração, a **Tabela 4.2** exhibe apenas os resultados sumarizados das medidas realizadas nos nossos espécimes.

Tabela 4.2: Valores medidos de Linha Plana (em mm) para diferentes valores de EW (largura da extrusão) e H (altura da camada).

		Altura camada (mm)		
		0,30	0,20	0,10
EW (mm)	0,48	0,459±0,023	0,486±0,012	-
	0,60	0,592±0,025	0,550±0,018	-
	0,80	0,616±0,018	0,672±0,018	-

A diferença entre os valores teóricos do modelo geométrico mostrados na **Tabela 4.1** e os valores medidos para a Linha Plana mostrados na **Tabela 4.2** são significativas. Podemos ver que os valores medidos se aproximam mais do valor EW solicitado ao programa fatiador. No modelo geométrico, o valor previsto para a Linha Plana deve-se apenas à diferença entre o valor EW solicitado e os raios dos bulbos laterais assumidos circulares, sem levar em consideração que o programa fatiador calcula o fluxo de material extrudado para obter o valor EW o mais próximo possível do valor solicitado. Podemos observar na **Tabela 4.2** que isso acontece para os valores de EW=0,48 mm e EW=0,60 mm. Para EW=0,80 mm, o valor obtido é bem menor devido à dificuldade de se conseguir imprimir uma linha com 0,8 mm de largura com um bico de apenas 0,4 mm.

Nos fatiadores modernos, o EW do preenchimento pode ser especificados com valor diferente do EW dos perímetros, mas nesta pesquisa mantivemos o mesmo valor para ambos.

4.3.2 Determinação do comprimento do fio depositado

O valor L, comprimento do fio depositado, necessário para a determinação da área efetiva de contato entre as camadas deve levar em consideração o número de perímetros e as linhas de preenchimento. Para os nossos espécimes, o comprimento dos perímetros, L_p , é dado pela circunferência que passa pelo centro do fio depositado. Para um espécime com 8mm de diâmetro na seção de *gauge* e um valor de EW=0,48 mm, o comprimento do perímetro externo (*outher perimeter*) será dado por:

$$L_p = \pi \times \left(D - \left(\frac{EW}{2} \right) \right) \quad (11)$$

E para os perímetros internos (n=2,3,4...),

$$L_p = \pi \times \left(D - (2n - 1) \times \left(\frac{EW}{2} \right) \right) \quad (12)$$

As equações (11) e (12) nos fornecem o comprimento de fio depositado para os perímetros. Para o comprimento do fio depositado no preenchimento, L_i , a equação fornecida por e-mail ao suporte do software fatiador Simplify3D, nem sempre fornece o valor correto, especialmente considerando a área pequena e circular da zona de *gauge* dos nossos espécimes. Daí a necessidade de se conhecer, para cada percentual de preenchimento e número de perímetros ajustado no fatiador, o comprimento efetivo de fio depositado em cada camada.

Para isso, utilizamos o caminho efetivo (*tool path*) descrito pelo bico da impressora ao realizar o preenchimento em cada camada. Essa informação pode ser obtida do arquivo gerado pelo fatiador e enviado para a impressora. O papel do firmware da impressora é interpretar esse código padrão de indústria (gcode) e transformá-lo nos sinais elétricos que vão efetivamente comandar os motores de passo da impressora para o movimento do cabeçote de impressão.

Assim, um programa escrito em .NET C# pelo autor, lê o arquivo gcode, identifica os comandos de preenchimento de uma camada da zona de *gauge* do espécime a ser impresso e calcula o comprimento dos fios depositados no preenchimento e nos perímetros. Os valores obtidos para os perímetros estão de acordo com os previstos pelas equações (11) e (12). A **Figura 4.17** mostra a tela principal do programa e a **Figura 4.18** o resultado do processamento para um espécime com 2 perímetros e 10% de preenchimento, mostrando os comprimentos do perímetro externo, do perímetro interno e do preenchimento. O programa também calcula a área efetiva usada no preenchimento em detrimento da área de preenchimento solicitada no programa fatiador.

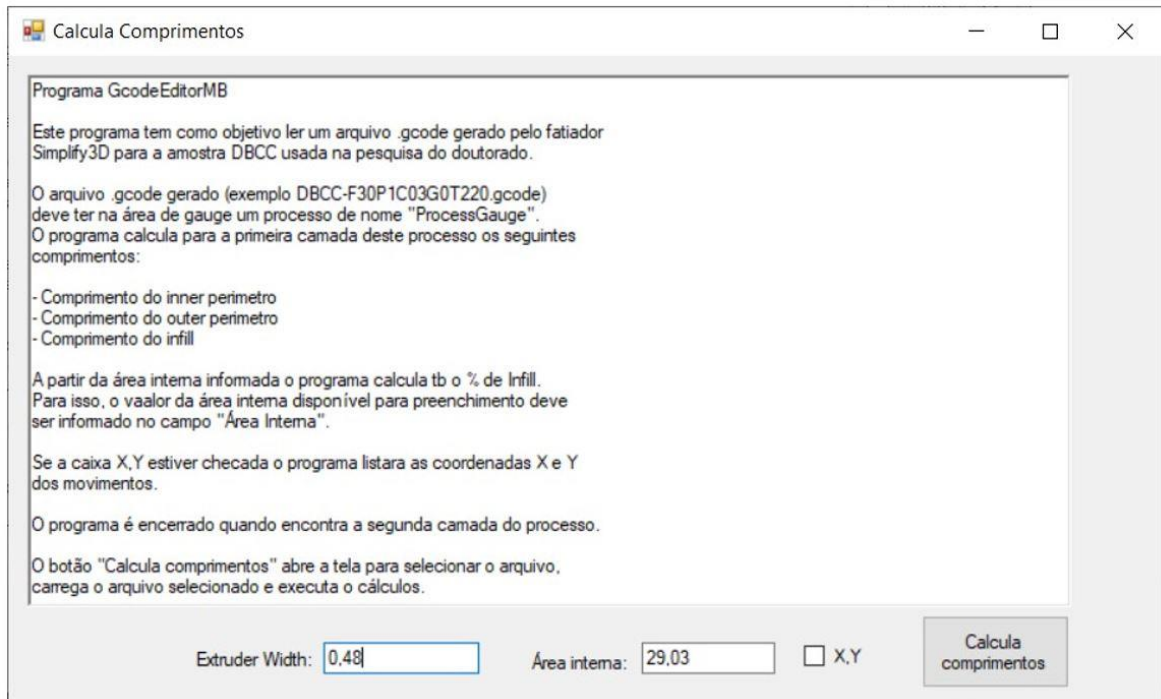


Figura 4.17: Tela do programa para extrair do arquivo gcode o comprimento dos fios depositados.

```

Arquivo: ..\Arquivos stl-gcode-x3g\DBCC-F10P2C03T220.gcode

Extruder Width (EW) = 0,48   Área interna informada: 29,03mm2

Process ProcessGauge:
Inner Perimetro - Comprimento: 20,585mm - Extruder: 1,232mm
Outer Perimetro - Comprimento: 23,604mm - Extruder: 1,415mm
Infill - Comprimento: 5,784mm - Extruder: 0,346mm - Percentual: 9,6%

```

Figura 4.18: Saída do programa Calcula Comprimentos

Assim, para cada amostra com parâmetros diferentes (perímetros e percentual de preenchimento) pudemos determinar o comprimento efetivo de fios depositados e, conhecendo a Linha Plana, determinar a área efetiva de contato entre as camadas de forma a calcular a Tensão de Rompimento (*Ultimate Tensile Stress*) verdadeira. A **Tabela 4.3** mostra o comprimento obtido pelo software nos arquivos gcode para as amostras com 1 perímetro, altura de camada igual a 0,3 mm e temperatura do bico de 220 °C.

Tabela 4.3: Comprimento L para as amostras utilizadas (1 Perímetro – Camada 0,3mm e Temperatura 220°C)

Nº	Amostra	Infill %	L. Infil mm	L. Perim mm
03	DBCC-F0P1C03G0T220	0	0	23,625
05	DBCC-F10P1C03G0T220	10	6,746	23,625
08	DBCC-F30P1C03T220	30	31,299	23,625
10	DBCC-F50P1C03T220	50	44,685	23,625
13	DBCC-F70P1C03G0T220	70	57,201	23,625
15	DBCC-F90P1C03G0T220	90	76,112	23,625
16	DBCC-F100P1C03T220	100	83,925	23,625

Nesta pesquisa, o EW (assumida por default no fatiador como 1.2 vezes o diâmetro do bico) foi mantido igual tanto para os perímetros quanto para o preenchimento (o que gera uma Linha Plana, LP, igual tanto para os perímetros quanto para o preenchimento (**Figura 4.14**), mas a determinação dos comprimentos dos perímetros e dos preenchimentos foi realizada separadamente de forma a se conhecer efetivamente a áreas de contato de cada uma dessas partes separadamente e podermos calcular a contribuição de cada feição para a resistência do espécime apenas em função dessa relação. Os valores de EW de cada uma dessas feições podem ser ajustados com valores diferentes, tanto para mais como para menos em alguns fatiadores, e consequentemente com contribuições diferentes para a resistência da peça uma vez que as áreas efetivas de contato seriam diferentes.

4.4 RELAÇÃO ENTRE PERÍMETRO E PREENCHIMENTO

Um parâmetro importante, que impacta diretamente no tempo de execução de uma peça, é a velocidade de deposição. Quanto maior a velocidade de impressão, menor o tempo de impressão. Mas esse parâmetro tem efeito inverso na qualidade final da peça. Normalmente o perímetro externo é impresso com uma velocidade percentualmente (50%) menor que a velocidade dos perímetros internos. Isso é feito para se obter um melhor acabamento e garantir uma maior precisão dimensional da peça. Entretanto, os perímetros, apesar de aumentarem a resistência à compressão lateral de uma peça (rigidez), são normalmente longos. Já o preenchimento, em alguns fatiadores, pode ser feito em uma velocidade maior uma vez que fica no interior da peça. Se essa diferença de velocidade não for muito grande, não deve comprometer a função de adição de resistência.

Para as nossas amostras uma vez que temos uma seção reta circular (camada) de diâmetro constante no *gauge*, podemos calcular a relação entre existe entre o comprimento do perímetro (ou perímetros) e comprimento relativo ao percentual de preenchimento.

Para uma seção circular com n perímetros, o comprimento total, L_p , dos perímetros é dado por:

$$L_p = \sum_{i=1}^n \pi(D - (2i - 1)EW) \quad (13)$$

E a área interna de preenchimento é dada por:

$$A = \frac{\pi}{4}(D - 2nEW)^2 \quad (14)$$

Como a área efetivamente preenchida o produto do comprimento do preenchimento L_i multiplicado pela largura de extrusão EW , a razão entre a área disponível e a área preenchida, que é o percentual de preenchimento solicitado ao fatiador, é igual a:

$$\%infill = \frac{L_i \times EW}{\frac{\pi}{4}(D - 2nEW)^2} \times 100 \quad (15)$$

O valor de L_i fica:

$$L_i = \frac{\pi \%infill (D - 2nEW)^2}{400 EW} \quad (16)$$

E portanto, a razão entre o comprimento do preenchimento e do perímetro é:

$$R_{pp} = \frac{\%infill}{400EW} \frac{(D - 2nEW)^2}{\sum_{i=1}^n (D - (2i - 1)EW)} \quad (17)$$

Os gráficos das **Figura 4.19**, **Figura 4.20** e **Figura 4.21** mostram a Razão comprimento do preenchimento versus o comprimento do perímetro, em função do % de preenchimento para camadas circulares com diâmetros diferentes e para 1, 2 e 3 perímetros. A interseção da reta de cada diâmetro com a linha horizontal em $R_{pp} = 1$ nos diz o valor em que o comprimento do preenchimento supera o comprimento do perímetro depositado. Podemos observar que para as nossas amostras, com diâmetro igual a 8mm, o comprimento do preenchimento só prevalece sobre o comprimento do perímetro para percentuais de preenchimento maiores que 30%. Já para uma peça com diâmetro de 32mm, esse valor cai para 6,4%.

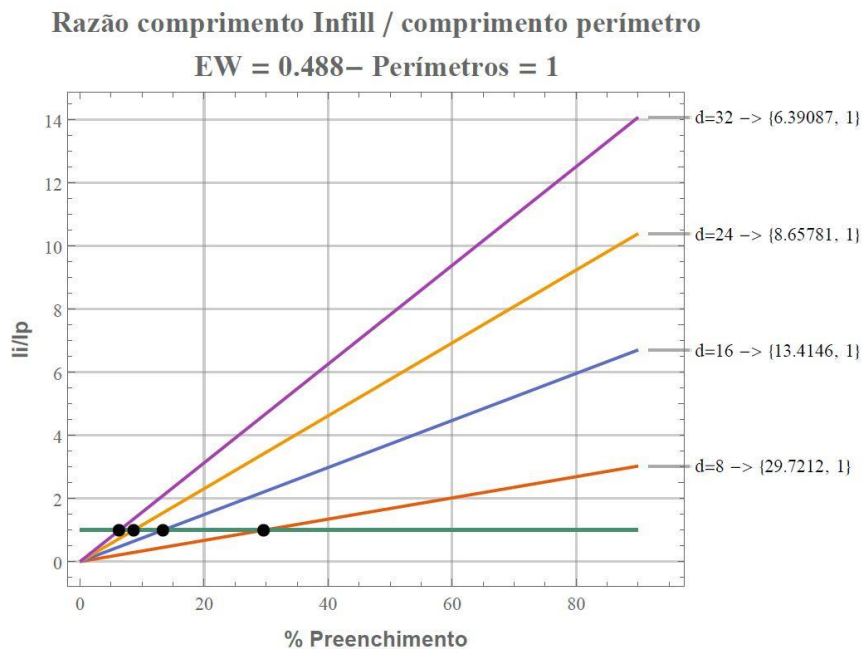


Figura 4.19: Razão comprimento do Infill / comprimento do perímetro para 1 perímetro

Para 2 perímetros, **Figura 4.20**, já observamos que somente após um valor de 75% para o preenchimento, a relação preenchimento/perímetro fica maior que 1 nas nossas amostras, mas peças com valores de diâmetros mais altos ainda se beneficiam do comprimento de preenchimento com percentuais mais baixos.

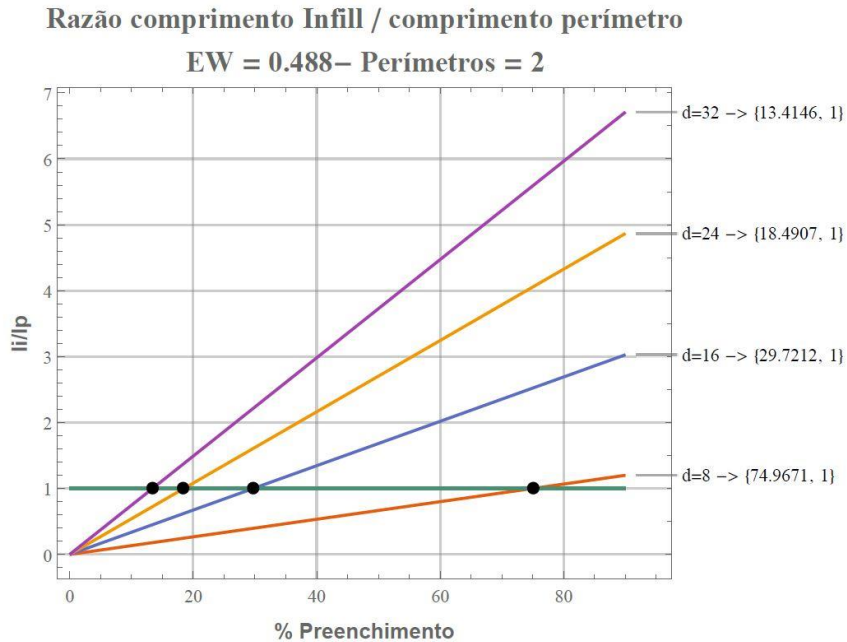


Figura 4.20: Razão comprimento do Infill / comprimento do perímetro para 2 perímetros

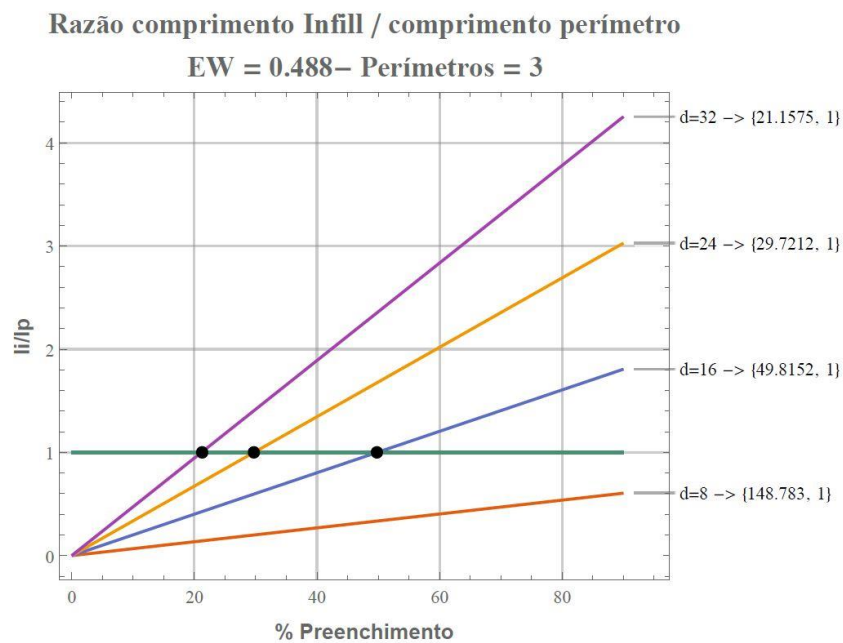


Figura 4.21: Razão comprimento do Infill / comprimento do perímetro para 3 perímetros

Nos intervalos de valores dos parâmetros (perímetros e percentual de preenchimento) usado em nossas amostras, observamos que para amostras com 1 perímetro, um percentual de

aproximadamente 30% de preenchimento já contribui com uma área de contato entre as camadas igual ao do perímetro. Para 2 perímetros, esse percentual sobe para 75%. Assim, para diâmetros tão pequenos como os das nossas amostras, com 3 perímetros o preenchimento da área interior que sobra não consegue competir com a área de contato dos perímetros.

Assim, apesar de que o preenchimento pode ser feito com uma velocidade maior (20% a 30%), podendo reduzir o tempo de impressão sem comprometer a resistência à tração, isso não se aplica para peças com áreas pequenas. Normalmente uma peça é impressa com 2 ou 3 perímetros e com um percentual de preenchimento não muito grande (entre 10% e 15%) com o objetivo de promover a resistência estrutural a compressão lateral e também como suporte para as camadas superiores. Naturalmente que isso varia de peça para peça, uma vez que o firmware da impressora tem a capacidade de acelerar e desacelerar o movimento do cabeçote da impressora em função do comprimento dos segmentos de reta que compõem cada caminho.

Na **Figura 4.22** podemos observar de outra forma as razões entre o comprimento do preenchimento e comprimento do perímetro (para 2 perímetros) em relação ao diâmetro de uma peça circular. Notamos por exemplo que peças com diâmetros maiores, podem atingir um comprimento do preenchimento maior do que o comprimento dos dois perímetros para baixos percentuais de preenchimento, o que implicaria obter uma maior área de contato entre as camadas mesmo com percentuais baixos de preenchimento.

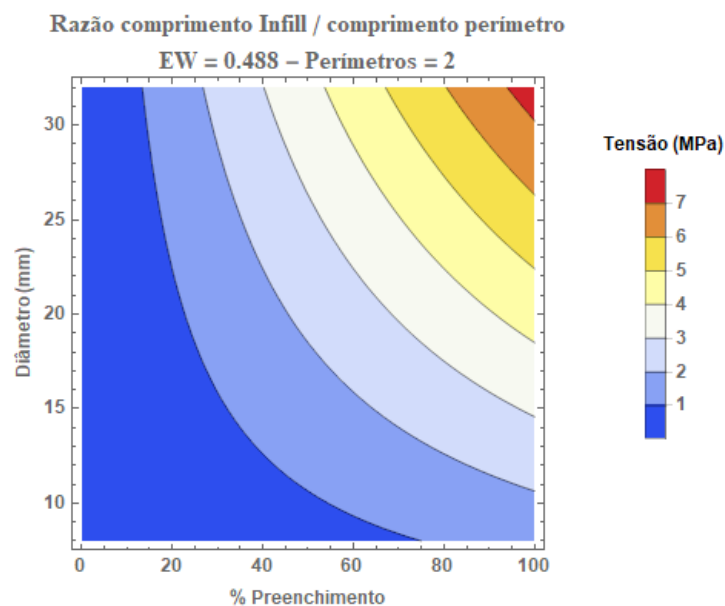


Figura 4.22: Razão entre comprimento do *Infill* e comprimento do perímetro para 2 perímetros

4.5 RELEVÂNCIA DOS PARÂMETROS ANALISADOS

A exemplo de diversos autores, como mencionado anteriormente, usamos o método Taguchi de Delineamento de Experimento com ANOVA para analisar a relevância dos parâmetros escolhidos. Esse método determina a escolha de um arranjo ortogonal que é feita baseada no grau de liberdade do modelo, definido pelas comparações que precisam ser realizadas entre os parâmetros para determinar qual e quanto é o melhor nível (LEE; ABDULLAH; KHAN, 2005).

O arranjo ortogonal L9 para o modelo de 3 parâmetros de entrada e 3 níveis é mostrada na **Tabela 4.4**.

Tabela 4.4: Plano experimental para uma matriz ortogonal L9

Ensaio	Níveis dos parâmetros		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

A partir desse arranjo, foram então impressos e ensaiados na máquina de teste de tração espécimes com as configurações cujos resultados estão mostrados na **Tabela 4.5**.

Tabela 4.5: Resultados experimentais para o arranjo ortogonal L9.

Área Total (mm ²)	Altura Camada (mm)	Temperatura (°C)	Tração (kN)
10,58	0,20	200	0,09
10,58	0,25	210	0,10
10,58	0,30	220	0,12
29,06	0,20	210	0,40
29,06	0,25	220	0,42
29,06	0,30	200	0,35
48,60	0,20	220	0,59
48,60	0,25	200	0,76
48,60	0,30	210	0,83

O software MINITAB foi utilizado para realizar a análise de variância (ANOVA) e a Análise do Modelo Taguchi. Na **Figura 4.23** está mostrado o resultado da ANOVA usando os valores da **Tabela 4.5**.

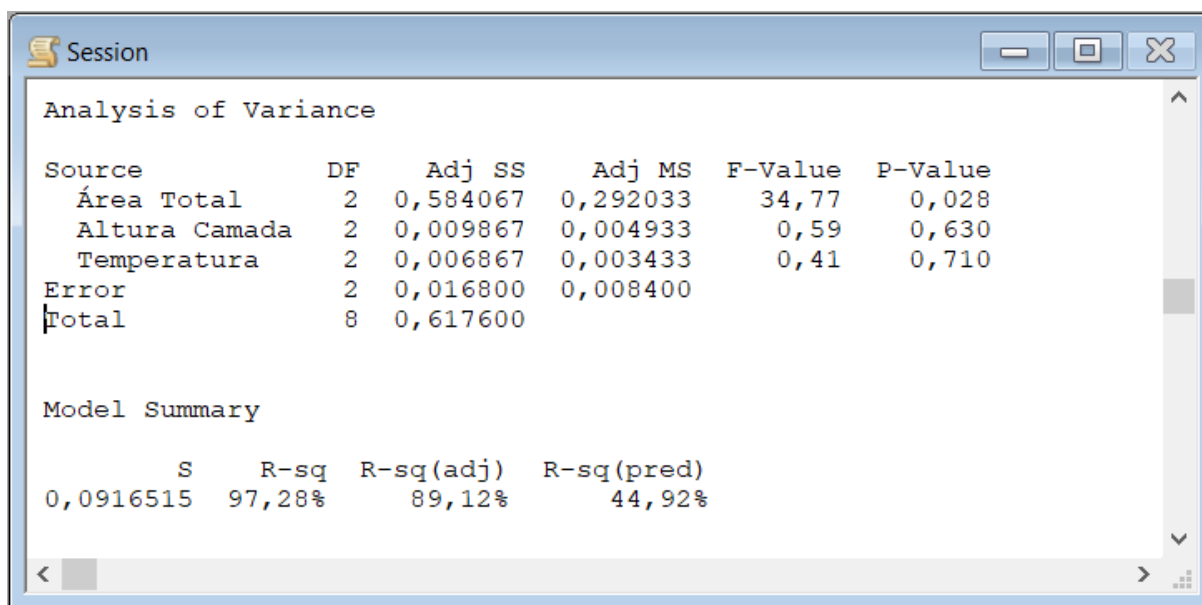


Figura 4.23: Resultado do ANOVA no MINITAB para a matriz L9.

O ANOVA usa a estatística F para verificar o quanto o termo é estatisticamente significativo. Um valor de F grande, $F > 4$, implica que uma mudança no parâmetro afeta significativamente a variável de saída estudada. No nosso resultado, o parâmetro Área Total tem um valor do teste F de 34,77 o que está de acordo com a hipótese de que esse parâmetro, entre os parâmetros analisados, é o que mais afeta a resistência a tração no acamamento vertical. O termo p-value é calculado a partir do teste-F, apresenta um valor $< 0,05$, o que corrobora a hipótese dessa associação, ajustada para um nível de 95% de confiança em todos os intervalos.

Para quantificar o ajuste do modelo aos valores fornecidos, devemos verificar os valores da estatística de qualidade, S e R^2 . O valor de S está relacionado ao quanto o modelo se ajusta aos dados e descreve a resposta. Quanto menor for esse valor melhor o ajuste. O valor da variação na resposta que é explicada pelo modelo é representado pelo valor de R^2 . Quanto maior esse valor mais ajustado está o modelo (MINITAB, 2018).

O valor percentual da contribuição de cada parâmetro estudado para a resistência a tração, é obtido pela razão entre a soma dos quadrados ajustada (AdjSS) calculado para o

parâmetro e o valor AdjSS total. A **Figura 4.24** mostra que dentre os parâmetros, a Área Total é, como esperado, quem mais contribui para a resistência a tração com 95% de contribuição. A contribuição dos parâmetros Altura da Camada e Temperatura aparece com valores inferiores a 2%.

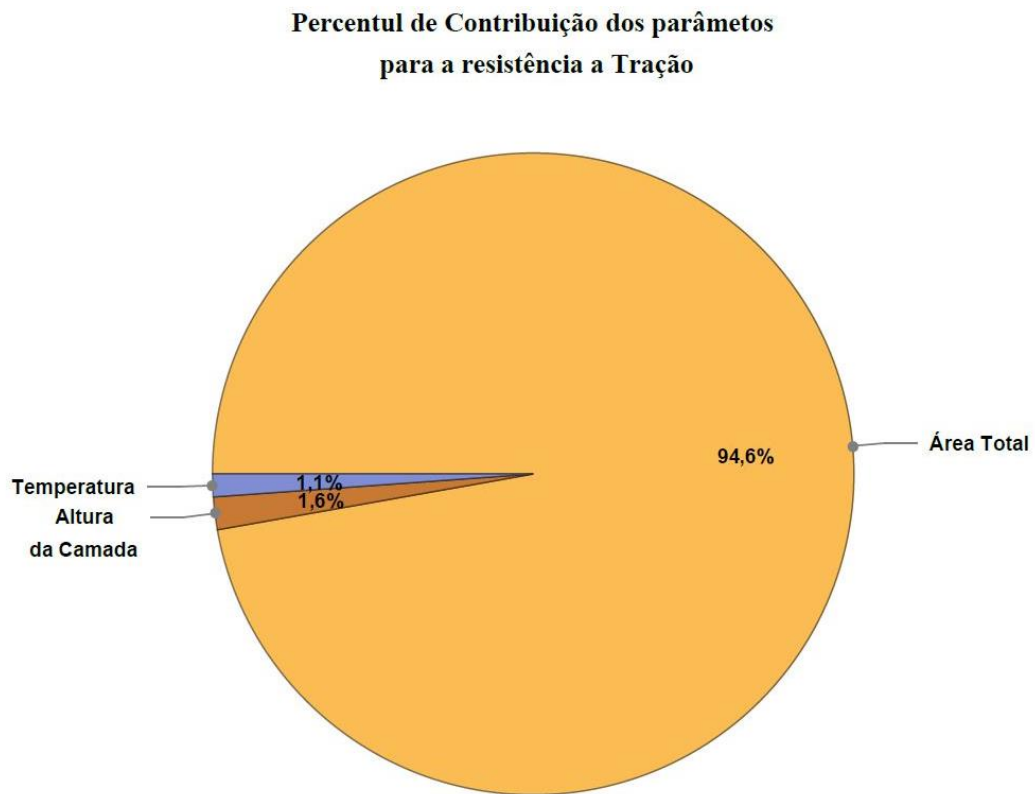


Figura 4.24: Contribuição dos parâmetros de processo para resistência a tração.

Na **Figura 4.25** temos os “Main Effect Plots” obtidos da Análise do Método Taguchi nos permite determinar a relação dos parâmetros com a resistência a tração, baseado na razão sinal/ruído (SN) calculada. De acordo com a análise feita, os melhores valores de resistência a tração são obtidos para os maiores valores da razão SN.

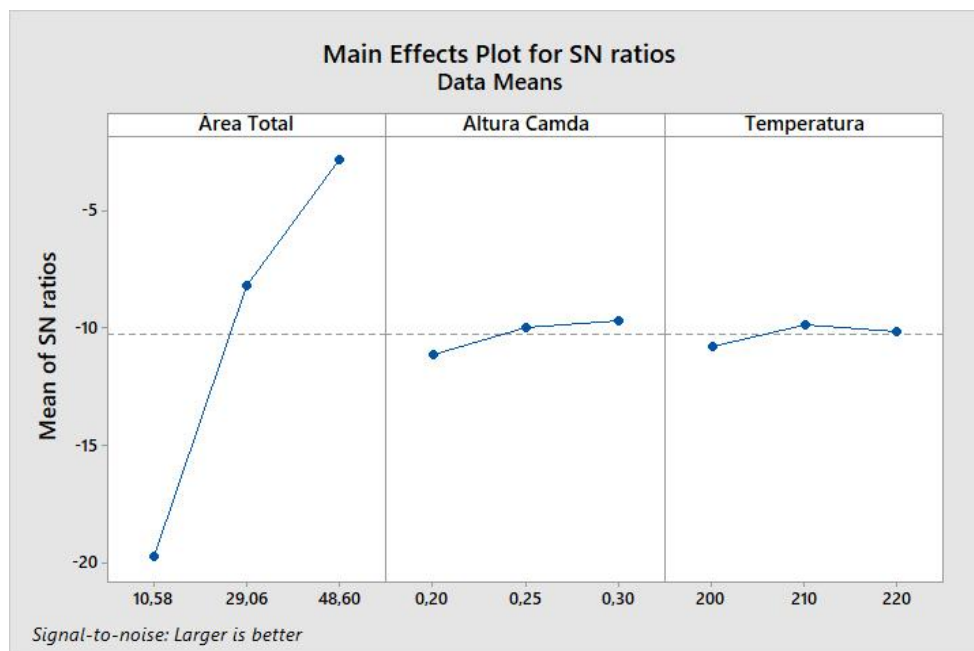


Figura 4.25: Razão SN para a Resistência a Tração (fonte: MINITAB).

Podemos observar que a razão SN aumenta substancialmente com a variação da Área Total e, apesar dos parâmetros Altura da Camada e Temperatura apresentarem uma variação SN muito pequena, corroborando a baixa contribuição desses parâmetros para a resistência a tração, essa variação mostra que a maior resistência a tração é obtida com a Área Total de 48,6 mm², com a Altura da Camada de 0,3 mm e com a Temperatura 210°C.

Para a Temperatura, é sabido que esse é um parâmetro relacionado com o material da impressão, mas também com fatores relacionados ao ambiente, à geometria e representação do modelo, características da impressora e outros, gerando a necessidade de um ajuste fino desse parâmetro antes da impressão definitiva de uma peça uma vez que esse parâmetro se relaciona com a precisão dimensional e acabamento final da peça. Quanto à direção XY, variações de temperatura podem alterar a estrutura do material e torná-lo menos resistente, mas na vertical, na direção Z, a fragilidade nas ligações entre as camadas é maior e mesmo que a temperatura altere características naturais do material, o valor da Tensão de ruptura é menor que o do material.

Quanto à Altura da Camada a relação da resistência a tração com esse parâmetro é pequena. Podemos observar na **Tabela 4.2** que para um EW de 0,48mm (1,2 x o diâmetro do bico), a variação medida da linha plana é da ordem de 0,03 (6%).

Entretanto, ainda assim, alguma relação existe entre a resistência a tração os parâmetros Temperatura de extrusão e Altura da Camada, como podemos observar nos Gráficos de Interação fornecidos pela análise do Método de Taguchi. Esse gráfico mostra a interação entre os fatores. Se os gráficos não são paralelos implica que a interação entre dois fatores depende do terceiro fator.

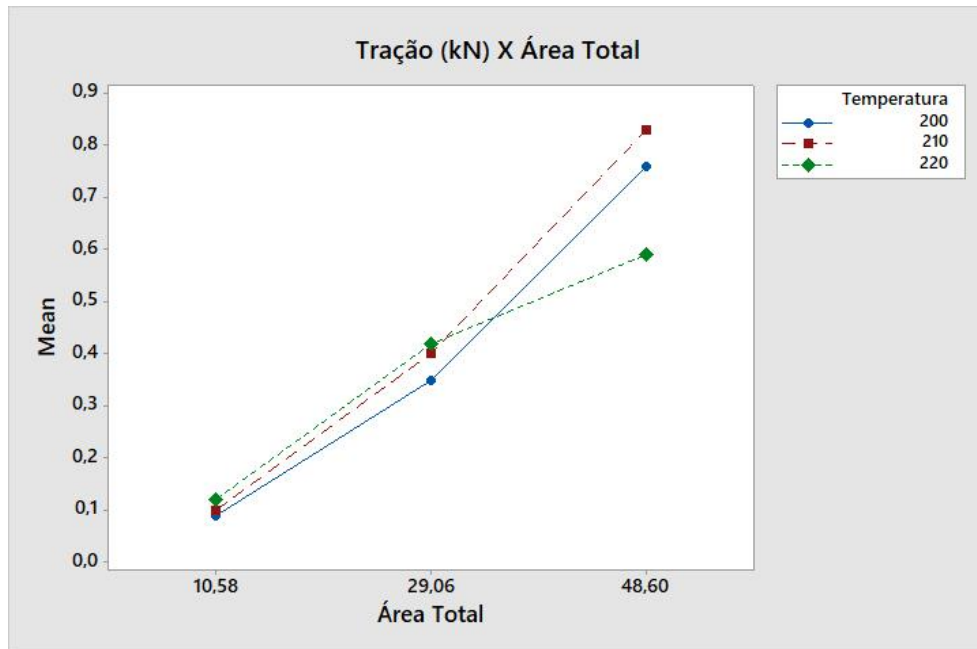


Figura 4.26: Interação do fator Temperatura na relação entre a Área Total e resistência a tração. (fonte: MINITAB)

No gráfico da **Figura 4.26** podemos ver que a relação entre a resistência a tração e a área total não depende do fator Temperatura para valores pequenos e intermediários da área de contato, mas que para áreas de contato maior, a maior resistência a tração é obtida para a temperatura de 210 °C.

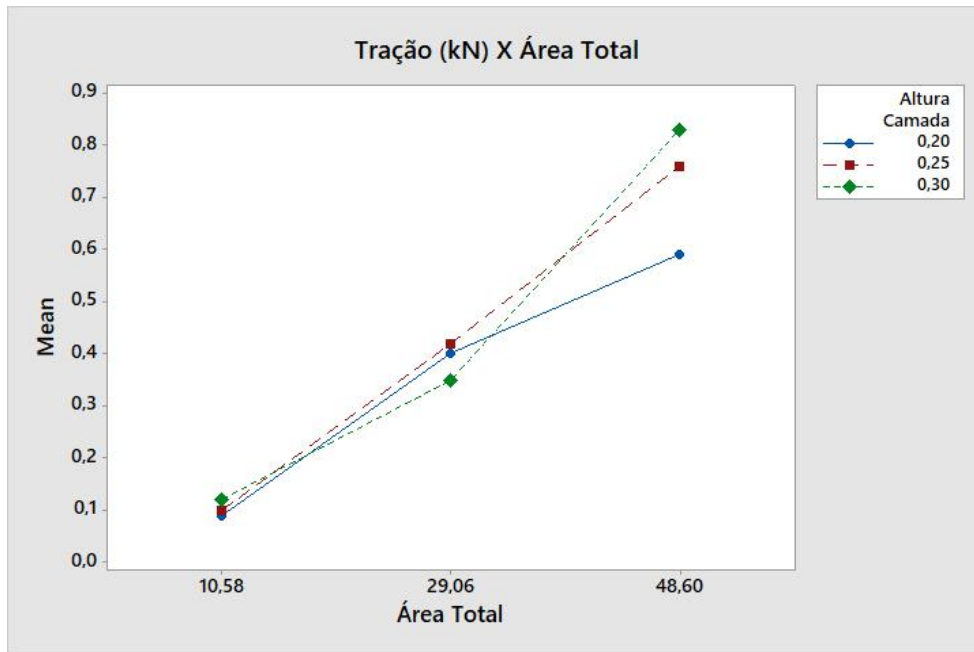


Figura 4.27: Interação do fator Altura da Camada na relação entre a Área Total e resistência a tração. (fonte: MINITAB)

No gráfico da **Figura 4.27** podemos ver que a relação entre a resistência a tração e a área total não depende do fator Altura da Camada para valores pequenos e intermediários da área de contato, mas que para áreas de contato maior, a maior resistência a tração é obtida para a camada de espessura de 0,3mm.

A ANOVA nos fornece uma equação de regressão para um Modelo Linear Geral que relaciona a Tração com a combinação dos três fatores e dos três níveis de cada fator. Essa equação é mostrada na **Figura 4.28**. Entretanto, essa equação não caracteriza uma equação geral função dos três fatores estudados. Uma equação mais geral será apresentada mais adiante. Antes disso, vamos analisar a mecânica da ruptura

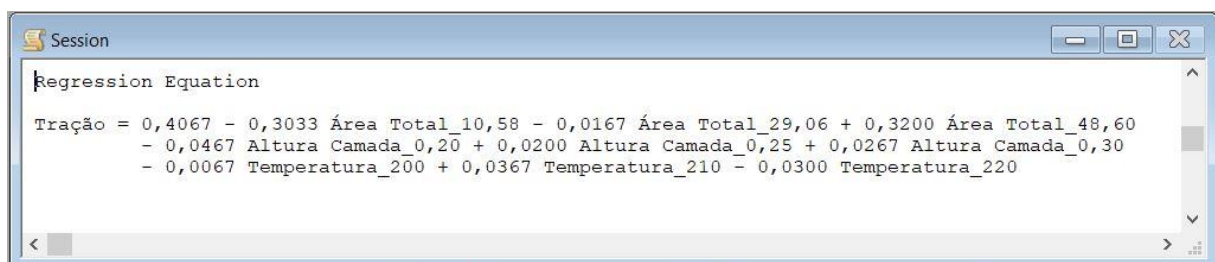


Figura 4.28: Equação de regressão obtida na ANOVA. (fonte: MINITAB)

4.6 MECÂNICA DA RUTURA DA AMOSTRA

Ao contrário de um espécime uniforme e sólido, um espécime impresso em impressora 3D, no sentido de deposição das camadas a área sobre a qual se dá ao Tensão é a área definida pelo produto da linha plana pelo comprimento da deposição na camada e uma variação (redução) na LP vai provocar um aumento da Tensão resultando no ponto de ruptura. Como podemos ver na **Figura 4.29**, os pontos de maior Tensão durante o ensaio de tração estão concentrados na interface entre as camadas.

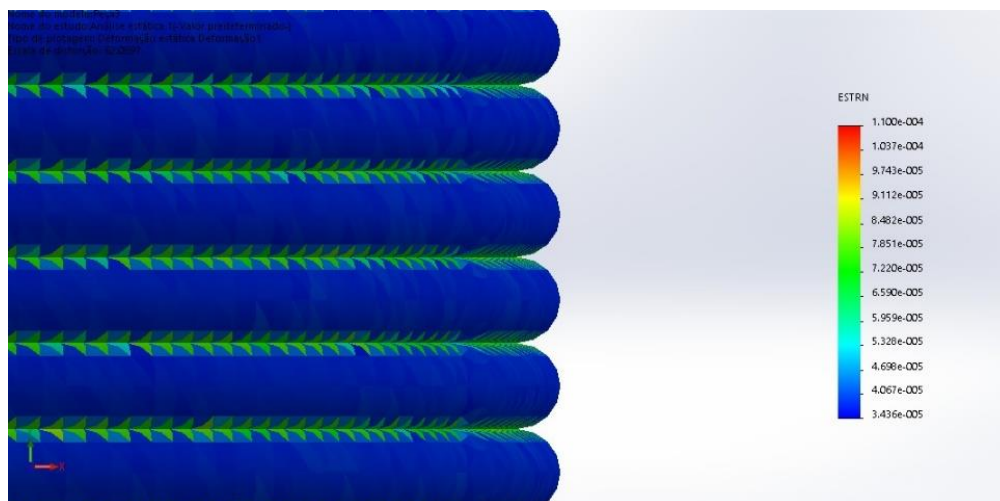


Figura 4.29: Análise de tensões na deposição entre camadas.

Nos ensaios realizados com os nossos espécimes, com um extensômetro com 22,2 mm de abertura (**Tabela 4.6**), a elongação medida no ponto de ruptura para a camada de 0,2 mm foi em média 0,13 mm e, para a camada de 0,3 mm em média 0,16 mm o que dividido pelo número de camadas neste comprimento nos leva aos valores de 0,002 mm e 0,001 mm respectivamente, de elongação entre cada camada.

Tabela 4.6: Elongação média medida pelo extensômetro nos ensaios realizados.

Camada (mm)	Elongação Média (mm)	Nº de Camadas	Elongação em cada camada (mm)
0,3	0,16	74	0,002
0,2	0,13	111	0,001

A implicação disso é que nos espécimes impressos, no sentido Z um valor muito pequeno de alongação é suficiente para romper a ligação formada durante a impressão pela difusão de calor entre as camadas (*inter-layer fracture mode*). Esses valores são bem menores que os observados em um espécime impresso no sentido XY, com preenchimento cruzado ou longitudinal, onde a alongação é muito grande antes da ruptura (da ordem de 1cm), o que sugere uma ruptura por rompimento da estrutura interna do polímero (*in-layer fracture mode*).

Em espécimes impressos no sentido XY mas simulando o acamamento de uma impressão vertical, o rompimento também ocorre com um valor pequeno de alongação, mas não tão pequeno, sugerindo a existência de outros fatores que contribuem para um valor de Tração de Rompimento mais alto e invalidam esse tipo de impressão para estudar a anisotropia vertical.

Isso nos leva a concluir que a resistência a tração no sentido vertical da impressão, está relacionada majoritariamente com a área de contato entre as camadas e que a determinação de um modelo matemático para determinar qual vai ser a resistência de uma peça a forças de tração aplicadas longitudinalmente no sentido de deposição das camadas, permitiria que parâmetros de impressão fossem acrescentados aos requisitos desde o projeto de uma peça.

4.7 A RELAÇÃO ENTRE A TENSÃO E OS PARÂMETROS ANALISADOS

A Tensão de Rompimento, ou simplesmente Tensão neste estudo, define a carga máxima por unidade de área para cada material, medido com espécimes sólidos. Assim, para um mesmo material, espécimes com áreas diferentes resultaria em um mesmo valor de Tensão e o gráfico de Tensão X Área seria obviamente uma reta horizontal. O que significa que a resistência à tração de uma peça construída com determinado material é função da área da peça. Um cilindro com área maior é mais resistente à tração do que um cilindro de área menor, para um mesmo material. Entretanto, para peças impressas em impressoras 3D pelo método de FDM essa grandeza nem sempre é a mais adequada. Peças feita em impressoras 3D geralmente são na sua maior parte ocas, e a resistência no sentido da anisotropia vertical é devido principalmente (como foi demonstrado anteriormente) à área de contato entre os fios depositados da camada (perímetros e preenchimento). Claro que poderíamos considerar que como a Tensão mede a resistência por unidade de área, espécimes completamente sólidos, com 100% de preenchimento poderiam ser usados para se determinar a tensão de rompimento para um determinado material de impressão, devido principalmente ao processo de fusão do plástico

entre as camadas (ligação entre as camadas). Mas isso só seria válido se para amostras com áreas de contato diferentes (fazendo variar o número de perímetros e o percentual de preenchimento) obtivéssemos valores constantes da Tensão. E não é isso que acontece.

O Apêndice I mostra a planilha de resultados dos ensaios de tração com os valores médios calculados para pelo menos 5 espécimes de cada amostra. Os valores de perímetro e percentual de preenchimento foram convertidos para Área Total de contato entre as camadas, determinando-se o comprimento depositado e medindo-se a Linha Plana para cada amostra. As colunas em destaque mostram os valores calculados da Tensão Real e da Área Total Percentual. A Tensão Real é calculada usando a área efetiva de contato entre as camadas (Área Total). A Área Total Percentual é calculada como o percentual da Área Total em relação à área da camada do espécime (50,27 mm²). Como estamos usando a unidade mm² para as áreas, a Tensão em Mpa é calculada pela expressão (18):

$$Tensão (MPa) = \frac{Tração (kg) \times 10}{área (mm^2)} \quad (18)$$

O DOE sugere o uso de uma o ajuste de uma função linear do tipo:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^n b_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (19)$$

onde Y é a variável de resposta e xi os fatores considerados para a análise.

Para a nossa pesquisa, a variável de resposta é a Tensão, e os fatores nossos parâmetros, Área Total Percentual, Altura da Camada e Temperatura de Extrusão.

Assim, o modelo linear fica:

$$T = b_0 + b_1 AT_{\%} + b_2 AC + b_3 T + b_4 AT_{\%} * AC + b_5 AT_{\%} * T + b_6 AC * T \quad (20)$$

Utilizamos o software Wolfram Mathematica para ajustar o modelo linear acima aos valores obtidos nos ensaios mostrados parcialmente na tabela apresentada no Apêndice I, obtendo:

$$T = 87,02 - 0,12 AT_{\%} - 284,71 AC - 0,35 T + 0,46 AT_{\%} \times AC + 3,96 \times 10^{-4} AT_{\%} \times T + 1,25 AC \times T \quad (21)$$

Com um coeficiente de correlação da ordem de 0,77, com uma distribuição dos resíduos (Figura 4.30) mostrando uma boa independência entre eles, indicando nenhuma tendência ou padrões, muito próximo de um ruído branco.

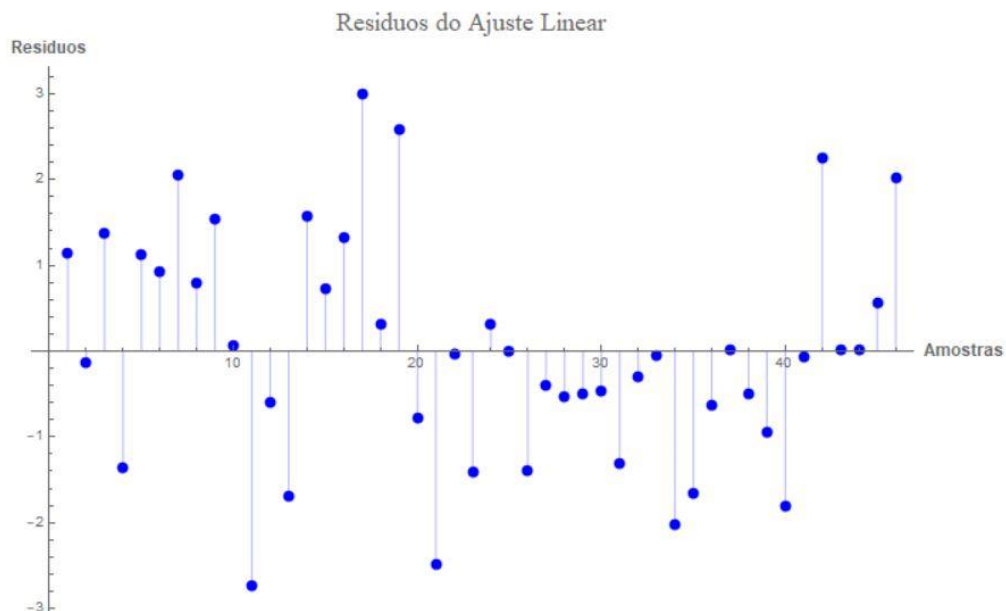


Figura 4.30: Resíduos da regressão da função Tensão.

É preciso observar que cada uma das nossas variáveis, bem como o valor da resposta (Tensão) possuem domínios limitados dentro dos níveis mostrados na Tabela 3.3, sendo que agora, para a Área Total Percentual temos 0-100%. O valor da Tensão máxima fornecido por essa equação não deve exceder o valor da Tensão de Rompimento máxima obtida para os espécimes com 100% de preenchimento.

O gráfico da **Figura 4.31** mostra valores de Tensão de rompimento em função dos parâmetros estudados.

Considerando o fato de que o parâmetro Temperatura tem uma influência pequena na resistência à Tração, podemos simplificar a análise utilizando um gráfico de contorno em 2D como o da **Figura 4.32**. Esse gráfico nos permite estabelecer os valores dos parâmetros a serem usados no fatiamento para obtermos uma dada resistência à tração em uma peça.

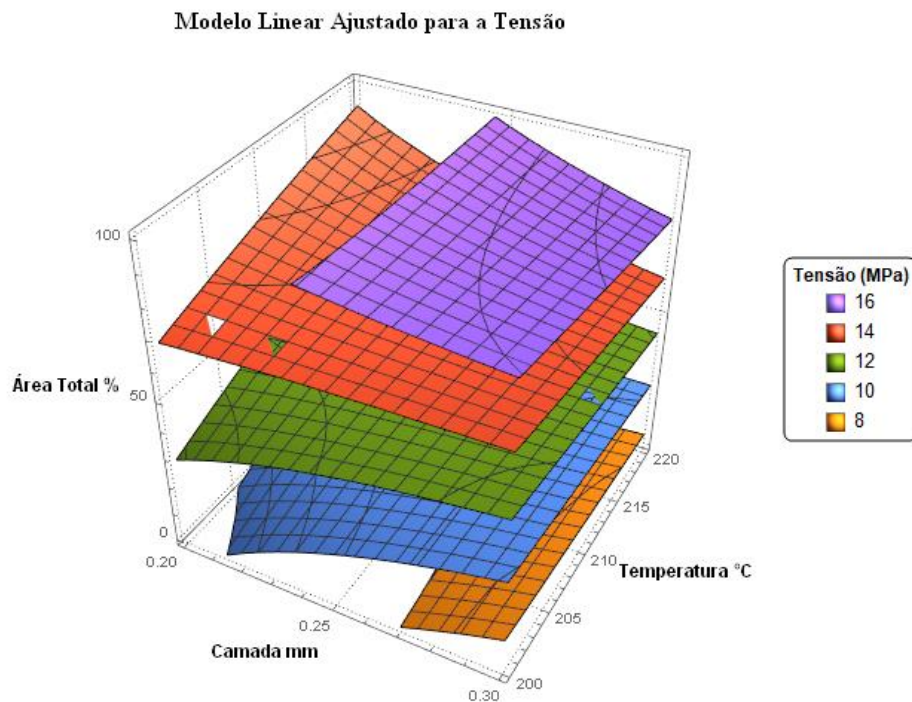


Figura 4.31: Modelo linear para a Tensão

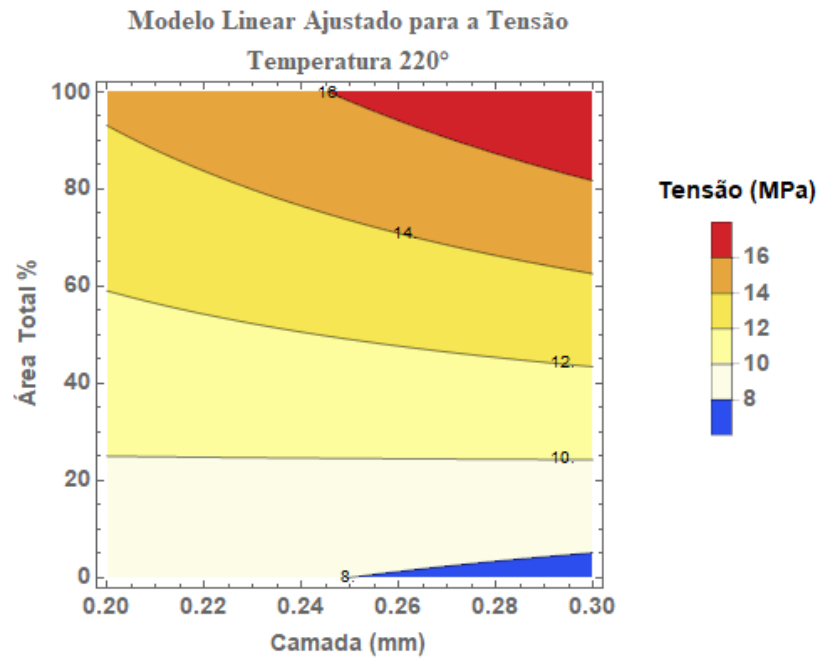


Figura 4.32: Tensão como função da Área Total % e da Altura da camada.

4.8 A RELAÇÃO ENTRE A TENSÃO E A ÁREA TOTAL PERCENTUAL

Quando analisamos comportamento entre a Tensão X Área Total de contato entre as camadas (**Figura 4.33**), podemos notar que o resultado difere significativamente do esperado para espécimes uniformes. O valor da Tensão não aparece como um valor constante.

Podemos observar neste gráfico que a Tensão se distribui em diferentes domínios da Área Total. Para valores pequenos de Área de contato (ela é predominantemente devido aos perímetros, uma vez que o preenchimento ainda tem pouca influência na Área de Contato - **Figura 4.8**), a Tensão tem um valor mais ou menos constante, com uma pequena elevação à medida que a área de preenchimento aumenta.

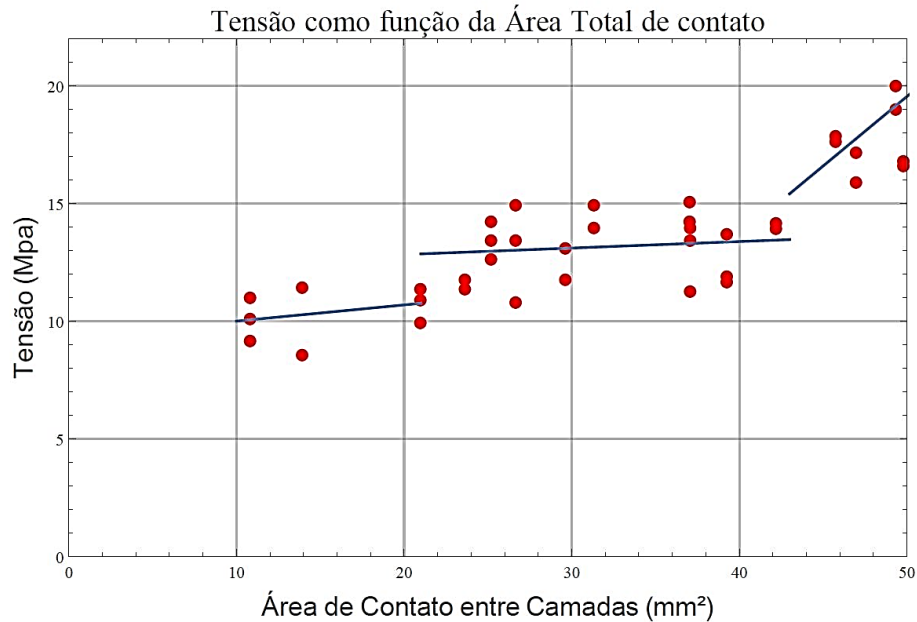


Figura 4.33: Tensão X Área Total para as amostras ensaiadas.

Para valores intermediários de Área de Contato (quando a área de contato do preenchimento compete com a área dos perímetros) a Tensão se situa em um valor mais constante como esperado para espécimes uniformes.

Para valores mais altos de Área de Contato (quando o percentual de preenchimento está acima de 90%) o valor da Tensão aumenta linearmente com uma taxa alta. Isso é devido ao fato de que para percentuais altos de preenchimento o plástico extrudado forma uma massa compactada que ocupa toda área de preenchimento, eliminando os “*air gaps*” (**Figura 2.4**) e aumentando a área de contato além do previsto apenas pela Linha Plana. Isso é mais acentuado quando temos apenas um perímetro porque nem mesmo o “*air gap*” entre os perímetros existe. Nesta situação temos a maior resistência à tração para os espécimes, resultando na máxima Tração suportada pelo PLA no sentido do acamamento das camadas, estando esse valor em torno de 18 MPa. A **Figura 4.34** mostra um corte longitudinal de um dos nossos espécimes com 100% de preenchimento, onde os “*air gaps*” (marcados em vermelho) deixam de existir devido ao preenchimento compacto de todo volume disponível.

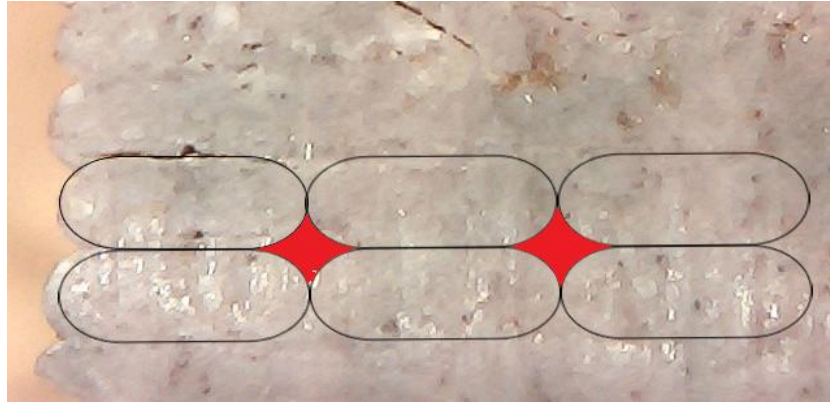


Figura 4.34: Corte longitudinal de um espécime com 100% de preenchimento.

Com o objetivo de determinar a melhor relação entre a área de contato e a Tensão para peças impressas em PLA vamos usar, no lugar da Área Total de contato, a Área Total Percentual. Como mencionado anteriormente, a Área Total Percentual é obtida pela relação percentual entre a Área Total de contato e a área da camada dos nossos espécimes.

A **Figura 4.35** é semelhante ao gráfico anterior, mas mostra a relação entre a Tensão e a Área Total Percentual. O comportamento da Tensão não é alterado para valores relativos adimensionais da área (0-100%).

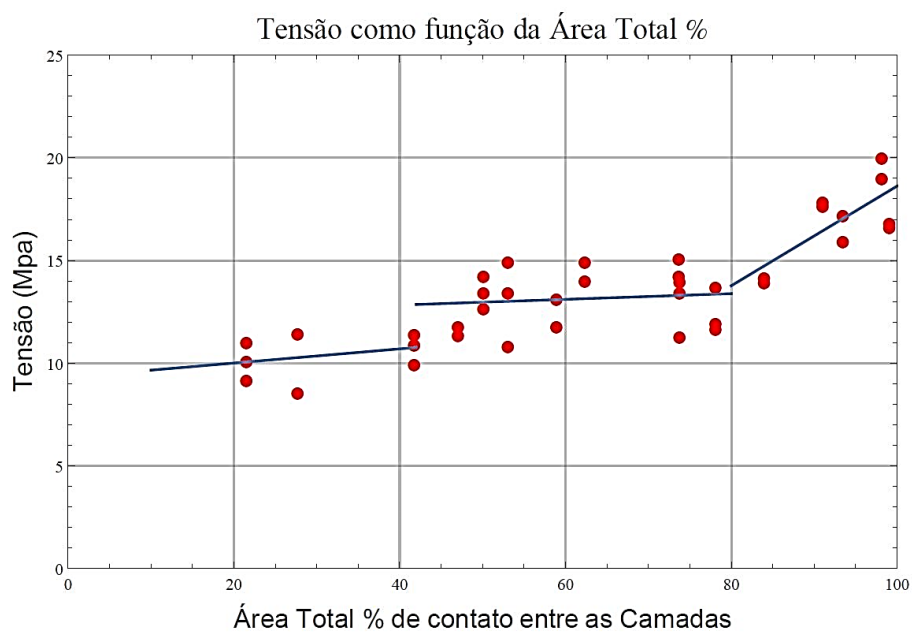


Figura 4.35: Tensão X Área Total Percentual para as amostras ensaiadas

Um ajuste linear único obtido com os valores obtidos nos ensaios de diversos espécimes nos conduz à Equação (22) e é mostrada na **Figura 4.36**. O coeficiente de regressão desse ajuste é de 0,71.

$$Tensão = 7,56 + 0,094 AT_{\%} \quad (22)$$

para um valor de Tensão máximo de 18 Mpa.

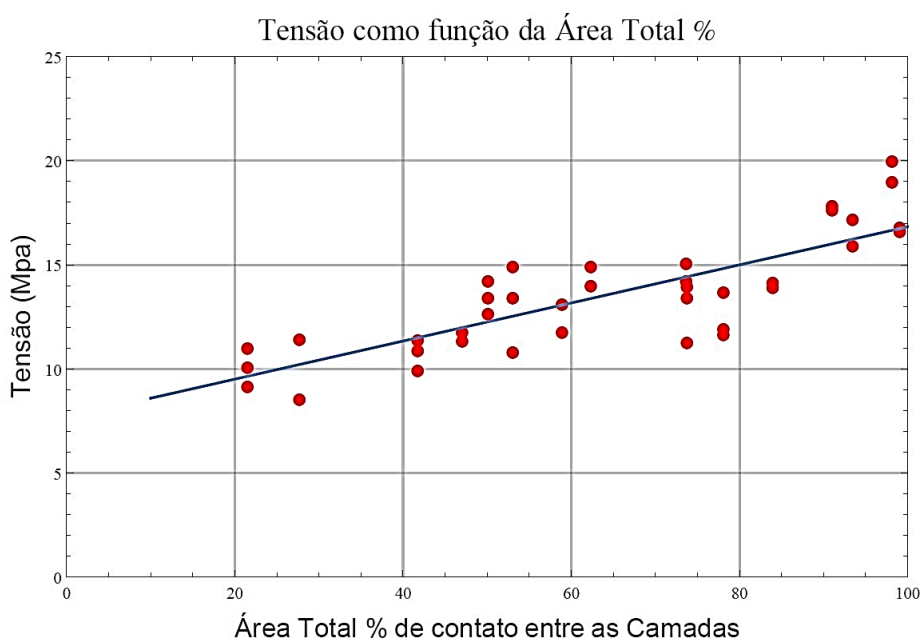


Figura 4.36: Ajuste Linear para a relação Tensão X Área Total Percentual

Quando projetamos uma peça a ser fabricada pelos processos convencionais, temos em vista a carga de tração que a peça deve suportar. Se a peça tem uma geometria específica, a escolha do material é função da tensão que o material pode suportar. Por exemplo, escolher se a peça vai ser fabricada em plástico, alumínio, aço ou outro material só depende da tensão que o material pode suportar. Mas em peças fabricadas em impressora 3D isso é diferente, dada a natureza anisotrópica devido ao processo de acamamento e ao fato de que as peças são normalmente ocas. A questão é saber se a geometria projetada para a peça, impressa com um determinado plástico, é capaz de suportar a carga de tração requerida e quais os parâmetros mínimos de fatiamento que devem ser empregados para obter a resistência necessária.

A equação (21) e mais facilmente a equação (22) podem ser usadas para responder essa pergunta. Considerando que a equação (22) pode ser reescrita como:

$$\frac{\text{Tração} \times 10}{\text{Área}_{\text{contato}}} = 7,56 + 0,094 \frac{\text{Área}_{\text{contato}}}{\text{Área}_{\text{peça}}} \times 100 \quad (23)$$

com a Tração em kg e as áreas em mm². Ou, simplificando a nomenclatura,

$$\frac{0,94}{A_p} A_c^2 + 0,756 A_c = Tr \quad (24)$$

Conhecendo a área projetada da peça e a tração máxima requerida, podemos resolver a equação acima para conhecer qual a área de contato necessária a ser obtida no fatiamento da peça. Considerando o valor de EW e o comprimento do fio depositado na camada (que pode ser obtido no software fatiador ou no arquivo gcode resultante) podemos ajustar os parâmetros perímetros e percentual de preenchimento.

Entretanto, devido ao que foi exposto acima sobre o valor da Tensão para diferentes domínios da variável Área Total Percentual, sugerimos uma expressão mais aderente a essa variação usando uma regressão polinomial de grau 3, mostrada na equação (25), com um coeficiente de regressão de 0,74 e mostrada na **Figura 4.37**.

$$\text{Tensão} = 3,58 + 0,38 AT_{\%} - 0,0057 AT_{\%}^2 + 3,29 \times 10^{-5} AT_{\%}^3 \quad (25)$$

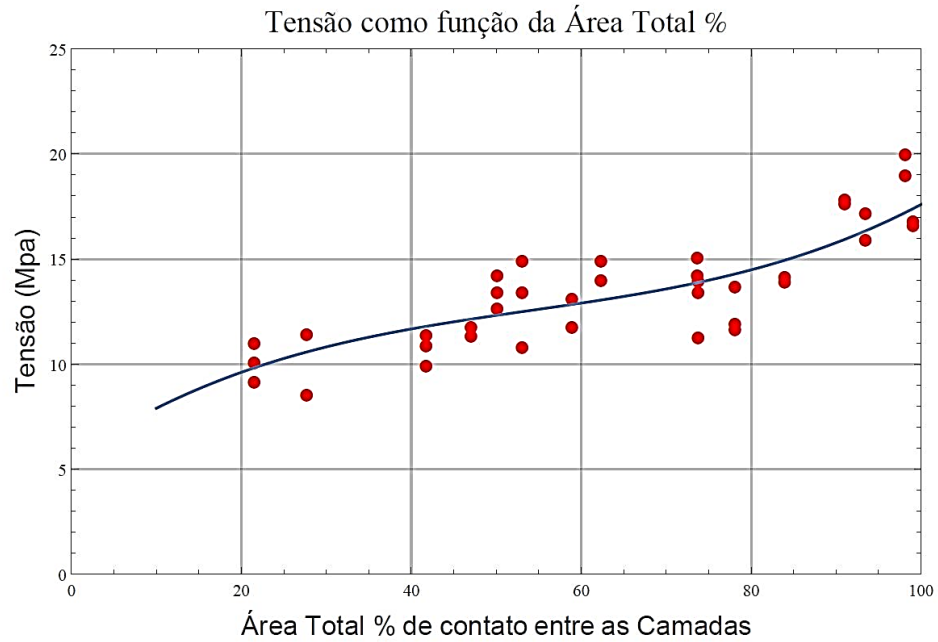


Figura 4.37: Regressão polinomial para a Tensão X Área Total %

Resolvendo a equação (25) no Wolfram Mathematica para uma tração de 50 kg, obtemos para os nossos espécimes (área de 50,27mm²) um valor de Área de Contato de 36,4 mm², o que difere apenas 1,9% do valor real médio estimado para a amostra DBCC-F70P1C03G0T220 rompida com essa carga.



Capítulo
5
CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta as conclusões e contribuições deste trabalho bem como as sugestões de trabalhos futuros.

O objetivo principal da pesquisa foi alcançado com a obtenção de relações matemáticas para a resistência entre as camadas de peças produzidas em PLA em impressoras 3D FDM como função da área de contato entre as camadas e outros parâmetros de fatiamento. Essas relações compõem uma metodologia inédita e inovadora que permite que projetos de peças a serem impressas em PLA possam prever e agregar, ainda na fase de projeto, valores de propriedades, peculiares à tecnologia FDM e ao preparo dos arquivos de impressão gerados pelos softwares fatiadores.

Entre os modelos obtidos, dois são lineares e um polinomial. Este último prevê melhor a relação entre a tensão e a área de contato uma vez que foi observado que a Tensão se distribui em diferentes domínios quando analisada em função da Área Total.

A utilização da área total de contato entre as camadas resultou ser mais adequada do que o uso de propriedades não analógicas como número de perímetros e relativas como percentual de preenchimento. Os softwares desenvolvidos durante a pesquisa permitiram a fácil obtenção desse valor apesar de não estarem presentes (ainda) nos programas fatiadores.

Uma análise a partir dos valores obtidos nos arquivos de impressão relacionando o perímetro com o percentual de preenchimento mostrou que peças com diâmetros maiores, podem atingir um comprimento do preenchimento maior do que o comprimento dos perímetros mesmo com baixos percentuais de preenchimento, o que implica obter uma maior área de contato entre as camadas.

Com um delineamento de experimentos adequado usando estatística ANOVA e o método de análise de Taguchi, determinamos a importância relativa das principais propriedades relacionadas à ligação entre as camadas, responsáveis pela anisotropia existente da resistência no sentido vertical da impressão. A área de contato entre as camadas aparece com uma importância relativa de 94,6% contra 1,1% para a temperatura e 1,6% para a altura da camada.

Uma nova geometria para as amostras de testes foi obtida considerando a inadequação das geometrias convencionais (tanto “*dog-bones*” chatos quanto cilíndricos), no que tange a fatores como: dificuldade de impressão, pequena área de preenchimento, defeitos relacionados ao processo de impressão e principalmente a problemas relacionados ao uso de garras que introduzem efeitos adversos contrários às especificações ASTM para testes de tração. Essa nova geometria nos permitiu eliminar dos ensaios todos esses fatores adversos.

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina de testes construída especialmente para essa pesquisa e dentro das especificações ASTM para máquinas de testes de tração. Garras especiais foram projetadas para acomodar a nova geometria das amostras e extensômetros também foram construídos para medir a elongação durante o ensaio.

Cortes transversais realizado nos espécimes ensaiados nos permitiu concluir que para preenchimentos com percentuais altos o preenchimento completo da área da camada faz desaparecer os “*air-gaps*” entre os fios depositados o que explica o porquê do súbito crescimento da resistência nesta região.

Os valores de Tensão máxima de rompimento da ligação entre as camadas obtida nessa pesquisa para o PLA, da ordem de 20Mpa, estão de acordo com os valores relatados na literatura utilizando impressão vertical dos espécimes e bem diferentes daqueles obtidos na simulação do acamamento vertical usando a impressão no plano XY.

A metodologia utilizada nesta pesquisa pode ser utilizada para outros materiais de impressão por FDM, como ABS, nylon etc.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Considerando que a metodologia utilizada acima pode ser aplicada a qualquer material usado na FDM, seria bastante útil ter as equações Tensão X Área Total Percentual ajustadas para outros materiais como ABS, Nylon, PET etc. O procedimento para tal seria realizar a impressão de alguns espécimes nesses materiais e medir a Tração Máxima de rompimento.

A pesquisa foi realizada considerando um preenchimento em linha, igual em todas as camadas, sem ângulo alternado entre as camadas. A impressão do preenchimento alternado reduz o custo em tempo e material uma vez que é feito em velocidade maior e um EW menor. Normalmente o principal papel do preenchimento é promover suporte para as camadas superiores e este tipo de preenchimento pouco contribui para a resistência entre as camadas. Assim, o projeto de peças com partes ocas internas gera perímetros internos no fatiamento o que aumentaria a área de contato entre as camadas. Um estudo de espécimes projetados assim serviria para obter os valores de equilíbrio entre resistência e custo para essa técnica.

Os softwares fatiadores são capazes de realizar vários padrões de preenchimento: linear, cruzado, casa de abelha etc. Sugerimos uma pesquisa para determinar qual o padrão de preenchimento leva a uma melhor relação de custo-benefício entre esses padrões e a resistência.

É sabido que a resistência do PLA ao longo da deposição do fio é pelo menos o dobro da resistência entre as camadas. Assim, um algoritmo que permitisse injetar plástico entre os vazios deixados pelos preenchimentos em pontos específicos (uma malha, por exemplo) de forma a criar “pinos” verticais atravessando grupos de camadas de forma alternada poderia aumentar a resistência entre as camadas para valores bem maiores do que os 20 MPa.

REFERÊNCIAS

AHMED, O.; HASAN, S.; LAL, J. Experimental investigation of time-dependent mechanical properties of PC-ABS prototypes processed by FDM additive manufacturing process. **Materials Letters**, v. 193, p. 58–62, 2017.

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

AHN, S. H. et al. Anisotropic Tensile Failure Model of Rapid Prototyping Parts - Fused Deposition Modeling (FDM). **International Journal of Modern Physics B**, v. 17, n. 08n09, p. 1510–1516, 2003.

ALI, F.; CHOWDARY, B. V.; MAHARAJ, J. Influence of Some Process Parameters on Build Time, Material Consumption, and Surface Roughness of FDM Processed Parts: Inferences Based on the Taguchi Design of Experiments. **Proceedings of The 2014 IACJ/ISAM Joint International Conference**, 2014.

ALVAREZ C., K. L.; LAGOS C., R. F.; AIZPUN, M. Investigating the influence of infill percentage on the mechanical properties of fused deposition modelled ABS parts. **Ingenieria e Investigacion**, v. 36, n. 3, p. 110–116, 2016.

ALVIN J FLINT. General Guidelines for Conducting Tests and Evaluating Data. In: ASTM-INTERNATIONAL (Ed.). . **The Basics of Testing Plastics: Mechanical Properties, Flame Exposure, and General Guidelines**. [s.l: s.n.]. p. 8–18.

ANDERSON, M. J.; WHITCOMB, P. J. **DOE Simplified**. [s.l: s.n.].

ASTM-D634-14. ASTM D638-14 - Standard test method for tensile properties of plastics. **ASTM International**, v. 08, p. 46–58, 2016.

ASTM-E4. ASTM E4 - 14, Standard Practices for Force Verification of Testing Machines. **Annual Book of ASTM Standards**, v. i, n. E4, p. 1–10, 2014.

ASTM-E83. ASTM E83-10a - Standard Practice for Verification and Classification of Extensometer Systems 1. **Annual Book of ASTM Standards**, p. 1–14, 2010.

ASTM E8. ASTM E8/E8M standard test methods for tension testing of metallic materials 1. **Annual Book of ASTM Standards 4**, n. C, p. 1–27, 2010.

BAICH, L.; MANOGHARAN, G.; MARIE, H. Study of infill print design on production cost-time of 3D printed ABS parts. **International Journal of Rapid Manufacturing**, v. 5, n. 3/4, p. 308, 2015.

BELLEHUMEUR, C. et al. Modeling of bond formation between polymer filaments in the fused deposition modeling process. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 6, n. 2, p. 170–178, 2004.

BRAHMBHATT, N. P.; PATEL, V. V; BRAHMBHATT, M. P. Optimization of Process Parameters of ABS Material Made by Fused Deposition Modeling - A Review. **International Journal for Scientific Research & Development**, v. 3, n. 01, p. 230–233, 2015.

BROWN, R. **Handbook of Polymer Testing – Short-term Mechanical Tests**. [s.l: s.n.].

BUTTON, S. T. **Metodologia Para Planejamento Experimental E Análise de Resultados**. [s.l: s.n.].

CAVALCANTE, A. A. et al. **LOW COST TENSILE TESTING MACHINE FOR FDM PARTS MECHANICAL BEHAVIOR CHARACTERIZATION**. ABCM International Congress of Mechanical Engineering. **Anais...Curitiba, PR-Brazil: 2017**Disponível em: <<http://www.sistema.abcm.org.br/articleFiles/download/9030>>

CHOCKALINGAM, K.; JAWAHAR, N.; CHANDRASEKHAR, U. Influence of layer thickness on mechanical properties in stereolithography. **Rapid Prototyping Journal**, v. 12, n. 2, p. 106–113, 2006.

CHRISTIYAN, K. G. J.; CHANDRASEKHAR, U.; VENKATESWARLU, K. A study on the influence of process parameters on the Mechanical Properties of 3D printed ABS composite. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 114, p. 012109, 2016.

COOGAN, T. J.; KAZMER, D. O. Modeling of interlayer contact and contact pressure during fused filament fabrication. **Journal of Rheology**, v. 63, n. 4, p. 655–672, 2019.

COSTA, A. E.; FERREIRA DA SILVA, A.; SOUSA CARNEIRO, O. A study on extruded filament bonding in fused filament fabrication. **Rapid Prototyping Journal**, v. 25, n. 3, p. 555–565, 2019.

DAVIS, J. R. **Tensile testing**. [s.l: s.n.].

FERNANDEZ-VICENTE, M. et al. Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing. **3D Printing and Additive Manufacturing**, v. 3, n. 3, p. 183–192, 2016.

GARLOTTA, D. A Literature Review of Poly (Lactic Acid). **Journal of Polymers and the Environment**, v. 9, n. 2, p. 63–84, 2002.

GONABADI, H.; YADAV, A.; BULL, S. J. The effect of processing parameters on the mechanical characteristics of PLA produced by a 3D FFF printer. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 111, n. 3–4, p. 695–709, 2020.

GOPSILL, J. A.; HICKS, B. J. Deriving infill design of fused deposition modelled parts from predicted stress profiles. **Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference**, v. 2A-2016, 2016.

GÓRSKI, F. et al. Strength of Abs Parts Produced By Fused Deposition Modelling Technology – a Critical Orientation Problem. **Advances in Science and Technology Research Journal**, v. 9, n. 26, p. 12–19, 2015.

GÓRSKI, F.; KUCZKO, W.; WICHNIAREK, R. Influence of Process Parameters on Dimensional Accuracy of Parts Manufactured Using Fused Deposition Modelling Technology. **Advances in Science and Technology – Research Journal**, v. 7, n. 19, p. 27–35, 2013.

HYLTON, D. C. **Understanding Plastic Testing**. [s.l: s.n.].

IVANOVA, O.; WILLIAMS, C.; CAMPBELL, T. Additive manufacturing (AM) and nanotechnology: Promises and challenges. **Rapid Prototyping Journal**, v. 19, n. 5, p. 353–364, 2013.

JAIN, P.; KUTHE, A. M. Feasibility study of manufacturing using rapid prototyping: FDM approach. **Procedia Engineering**, v. 63, p. 4–11, 2013.

KARNA, S. K.; SAHAI, R. An overview on Taguchi Method. **Journal Of Radiation Research**, v. 11, 2012.

KULKARNI, P.; DUTTA, D. Deposition strategies and resulting part stiffnesses in fused deposition modelling. **Journal of Manufacturing Science & Engineering**, v. Vol.121, n. February 1999, p. 93–103, 1999.

LANZOTTI, A. et al. The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer. **Rapid Prototyping Journal**, v. 21, n. 5, p. 604–617, 2015.

LAY, M. et al. Comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS and nylon 6 fabricated using fused deposition modeling and injection molding. **Composites Part B: Engineering**, v. 176, n. August, p. 107341, 2019.

LEE, B. H.; ABDULLAH, J.; KHAN, Z. A. Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 169, n. 1, p. 54–61, 2005.

LEE, J.; HUANG, A. Fatigue analysis of FDM materials. **Rapid Prototyping Journal**, v. 19, n. 4, p. 291–299, 2013.

LI, L. et al. Investigation of Bond Formation in FDM Process. **Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME**, v. 31, n. August, p. 613–620, 2015.

MARTÍNEZ, J. et al. Comparative between FEM models for FDM parts and their approach to a real mechanical behaviour. **Procedia Engineering**, v. 63, p. 878–884, 2013.

MINITAB. **Interpretar os principais resultados para ANOVA para um fator**. Disponível em: <<https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/how-to/one-way-anova/interpret-the-results/key-results/>>.

MONTERO, M.; ROUNDY, S.; ODELL, D. Material characterization of fused deposition modeling (FDM) ABS by designed experiments. **Proceedings of Rapid Prototyping & Manufacturing Conference**, p. 1–21, 2001.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. [s.l: s.n.]. v. 2

NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH. **ImageJ - Image Processing and Analysis Software**. Disponível em: <<https://www.itlvis.com/envi/%0Ahttps://imagej.nih.gov/ij/index.html>>. Acesso em: 3 fev. 2021.

NIST/SEMATECH. **e-Handbook of Statistical Methods**. Disponível em: <<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>>.

ONWUBOLU, G. C.; RAYEGANI, F. Characterization and Optimization of Mechanical Properties of ABS Parts Manufactured by the Fused Deposition Modelling Process. **International Journal of Manufacturing Engineering**, v. 2014, p. 1–13, 2014.

RAJENDRSINH DARBAR & PRAJESH M. PATEL. Optimization of Fused Deposition Modeling Process Parameter for Better Mechanical Strength and Surface Roughness. **International Journal of Mechanical Engineering (IJME)**, v. 6, n. 6, p. 7–18, 2017.

RODRÍGUEZ, J. F.; THOMAS, J. P.; RENAUD, J. E. Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) fused deposition materials . Experimental investigation *Águez*. v. 7, n. 3, p. 148–158, 2006.

SAJJAD, R. et al. Investigating the Impacts of Heterogeneous Infills on Structural Strength of 3D Printed Parts. **Key Engineering Materials**, v. 799, p. 276–281, 2019.

SANTHAKUMAR, J.; MOHAMMED IQBAL, U. M.; PRAKASH, M. Investigation on the effect of tensile strength on fdm build parts using taguchi-grey relational based multi-response optimization. **International Journal of Mechanical Engineering and Technology**, v. 8, n. 12, p. 53–60, 2017.

SANTHANABHARATHI, N. S.; VENKATRAMANAN, S. Effect of Fdm Process Parameters in Abs Plastic Material. v. 3, n. 1, p. 14–23, 2017.

SOOD, A. K.; OHDAR, R. K.; MAHAPATRA, S. S. Improving dimensional accuracy of Fused Deposition Modelling processed part using grey Taguchi method. **Materials and Design**, v. 30, n. 10, p. 4243–4252, 2009.

SREEDHAR, P.; MATHIKUMARMANIKANDAN, C.; JOTHI, G. Experimental Investigation of Surface Roughness for Fused Deposition Modeled Part with Different Angular Orientation. **International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology**, v. 5, n. 3, p. 21–28, 2012.

SWETHAM, T. et al. A Critical Review on of 3D Printing Materials and Details of Materials used in FDM. **International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology**, v. 3, n. 2, p. 353–361, 2017.

THOMAS, J. P.; FODRIGUEZ, J. F. Modeling the Fracture Strength Between Fused-Deposition Extruded Roads. **Solid Freeform Fabrication Proceedings**, p. 17–23, 2000.

THRIMURTHULU, K.; PANDEY, P. M.; REDDY, N. V. Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling. **Computer-Aided Design and Applications**, v. 2, n. 1–4, p. 319–328, 2003.

TORRES, J. et al. An approach for mechanical property optimization of fused deposition modeling with polylactic acid via design of experiments. **Rapid Prototyping Journal**, v. 22, n. 2, p. 387–404, 2016.

TRONVOLL, S. A.; WELO, T.; ELVERUM, C. W. The effects of voids on structural properties of fused deposition modelled parts: a probabilistic approach. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 97, n. 9–12, p. 3607–3618, 2018.

VILLALPANDO, L.; EILIAT, H.; URBANIC, R. J. An optimization approach for components built by fused deposition modeling with parametric internal structures. **Procedia CIRP**, v. 17, p. 800–805, 2014.

WANG, J. Y. et al. Effects of nozzle-bed distance on the surface quality and mechanical properties of fused filament fabrication parts. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 479, n. 1, 2019.

WEEREN, R. VAN et al. Quality of Parts Processed by Fused Deposition. p. 314–321, 1995.

WOOL, R. P.; O’CONNOR, K. M. A theory of crack healing in polymers. **Journal of Applied Physics**, v. 52, n. 10, p. 5953–5963, 1981.

YARDIMCI, M. A et al. Part quality prediction tools for fused deposition processing. **Solid Freeform Fabrication Proceedings, September 1996**, p. 539–548, 1996.

ZHANG, M. Y. Understanding additive manufacturing part performance through modeling and laboratory experiments. **122nd ASEE Annual Conference & Exposition**, n. December 2007, 2015.

ZHANG, Q. et al. Bioinspired engineering of honeycomb structure - Using nature to inspire human innovation. **Progress in Materials Science**, v. 74, p. 332–400, 2015.

ZIEMIAN, C.; SHARMA, M.; ZIEMI, S. Anisotropic Mechanical Properties of ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modelling. In: **Mechanical Engineering**. [s.l: s.n.].

APÊNDICES

APÊNDICE I - Tabela com resultados dos ensaios realizados

Tabela com resultados sumarizados da média de pelo menos 5 ensaios de cada amostra.

Amostra	Camada (mm)	Temp (°C)	Infill				Perímetros			Área		Tração (kN)	Tensão	
			Real (%)	compr. (%)	Área (mm ²)	Qtd	Compr. (mm)	Área (mm ²)	Total (mm ²)	Total (%)	(MPa)		Real (MPa)	
DBCC-F0P1C03G0T200	0,30	200	0	0	0,00	0,00	1	23,60	10,83	10,83	21,6	0,1	2,0	10,2
DBCC-F0P1C03G0T210	0,30	210	0	0	0,00	0,00	1	23,60	10,83	10,83	21,6	0,1	1,9	9,2
DBCC-F0P1C03G0T220	0,30	220	0	0	0,00	0,00	1	23,60	10,83	10,83	21,6	0,1	2,4	11,1
DBCC-F10P1C03G0T210	0,30	210	10	8,3	6,75	3,10	1	23,60	10,83	13,93	27,7	0,1	2,4	8,6
DBCC-F10P1C03G0T220	0,30	220	10	8,3	6,75	3,10	1	23,60	10,83	13,93	27,7	0,2	2,9	11,5
DBCC-F30P1C03G0T200	0,30	200	30	38,6	31,30	14,37	1	23,60	10,83	25,20	50,1	0,3	5,9	12,7
DBCC-F30P1C03G0T210	0,30	210	30	38,6	31,30	14,37	1	23,60	10,83	25,20	50,1	0,4	7,1	14,3
DBCC-F30P1C03T220	0,30	220	30	38,6	31,30	14,37	1	23,60	10,83	25,20	50,1	0,3	6,8	13,5
DBCC-F50P1C03T210	0,30	210	50	55,1	44,69	20,51	1	23,60	10,83	31,34	62,4	0,5	9,4	15,0
DBCC-F50P1C03T220	0,30	220	50	55,1	44,69	20,51	1	23,60	10,83	31,34	62,4	0,4	8,7	14,0
DBCC-F70P1C03G0T200	0,30	200	70	70,5	57,20	26,26	1	23,60	10,83	37,09	73,8	0,4	7,8	11,3
DBCC-F70P1C03G0T210	0,30	210	70	70,5	57,20	26,26	1	23,60	10,83	37,09	73,8	0,5	10,4	14,0
DBCC-F70P1C03G0T220	0,30	220	70	70,5	57,20	26,26	1	23,60	10,83	37,09	73,8	0,5	9,9	13,5
DBCC-F90P1C03G0T210	0,30	210	90	93,9	76,11	34,94	1	23,60	10,83	45,77	91,1	0,8	15,1	17,9
DBCC-F90P1C03G0T220	0,30	220	90	93,9	76,11	34,94	1	23,60	10,83	45,77	91,1	0,8	16,1	17,7
DBCC-F100P1C03T220	0,30	220	100	103,5	83,93	38,52	1	23,60	10,83	49,36	98,2	0,9	17,5	19,0
DBCC-F100P1C03G0T210	0,30	210	100	103,5	83,93	38,52	1	23,60	10,83	49,36	98,2	1,0	18,4	20,1
DBCC-F0P1C02G0T200	0,20	200	0	0	0,00	0,00	1	23,63	11,48	11,48	22,8	0,1	1,4	7,0
DBCC-F0P1C02G0T210	0,20	210	0	0	0,00	0,00	1	23,63	11,48	11,48	22,8	0,1	1,5	7,0
DBCC-F30P1C02G0T200	0,20	200	30	38,6	31,29	15,21	1	23,60	11,47	26,68	53,1	0,4	6,6	13,5
DBCC-F30P1C02G0T210	0,20	210	30	38,6	31,29	15,21	1	23,60	11,47	26,68	53,1	0,4	7,4	15,0
DBCC-F30P1C02G0T220	0,20	220	30	8,3	31,29	15,21	1	23,60	11,47	26,68	53,1	0,3	5,3	10,9
DBCC-F70P1C02G0T200	0,20	200	70	70,5	57,19	27,79	1	23,60	11,47	39,27	78,1	0,5	8,8	12,0
DBCC-F70P1C02G0T210	0,20	210	70	70,5	57,19	27,79	1	23,60	11,47	39,27	78,1	0,5	9,9	13,8
DBCC-F70P1C02G0T220	0,20	220	70	70,5	57,19	27,79	1	23,60	11,47	39,27	78,1	0,5	8,5	11,7
DBCC-F100P1C02G0T210	0,20	210	100	103,5	83,86	40,76	1	23,60	11,47	52,23	103,9	0,8	14,9	15,5
DBCC-F0P2C03G0T200	0,30	200	0	0	0,00	0,00	2	45,74	21,00	21,00	41,8	0,2	4,3	11,0
DBCC-F0P2C03G0T210	0,30	210	0	0	0,00	0,00	2	45,74	21,00	21,00	41,8	0,2	3,9	10,0
DBCC-F0P2C03G0T220	0,30	220	0	0	0,00	0,00	2	45,74	21,00	21,00	41,8	0,2	4,5	11,4
DBCC-F10P2C03G0T220	0,30	220	10	9,6	5,79	2,66	2	45,74	21,00	23,65	47,1	0,3	5,6	11,8
DBCC-F10P2C03G0T210	0,30	210	10	9,6	5,79	2,66	2	45,74	21,00	23,65	47,1	0,3	5,0	11,4
DBCC-F30P2C03T220	0,30	220	30	31,1	18,82	8,64	2	45,74	21,00	29,63	59,0	0,4	7,8	13,2
DBCC-F30P2C03G0T210	0,30	210	30	31,1	18,82	8,64	2	45,74	21,00	29,63	59,0	0,4	6,4	11,8
DBCC-F50P2C03T210	0,30	210	50	57,8	34,97	16,05	2	45,74	21,00	37,05	73,7	0,5	9,8	14,3
DBCC-F50P2C03T220	0,30	220	50	57,8	34,97	16,05	2	45,74	21,00	37,05	73,7	0,6	11,2	15,1
DBCC-F70P2C03T220	0,30	220	70	76,4	46,22	21,22	2	45,74	21,00	42,21	84,0	0,6	11,9	14,2
DBCC-F70P2C03G0T210	0,30	210	70	76,4	46,22	21,22	2	45,74	21,00	42,21	84,0	0,6	11,0	14,0
DBCC-F90P2C03G0T210	0,30	210	90	93,6	56,63	25,99	2	45,74	21,00	46,99	93,5	0,8	13,9	16,0
DBCC-F90P2C03G0T220	0,30	220	90	93,6	56,63	25,99	2	45,74	21,00	46,99	93,5	0,8	15,0	17,2
DBCC-F100P2C03T210	0,30	210	100	103,8	62,78	28,82	2	45,74	21,00	49,81	99,1	0,8	15,5	16,7
DBCC-F100P2C03G0T220	0,30	220	100	103,8	62,78	28,82	2	45,74	21,00	49,81	99,1	0,8	15,6	16,9
DBCC-F0P1C025T210	0,25	210	0	0	0,00	0,00	1	23,61	10,84	10,84	21,6	0,1	1,77	8,2
DBCC-F10P1C025T210	0,25	210	10	8,3	6,75	3,10	1	23,61	10,84	13,94	27,7	0,1	2,89	10,4
DBCC-F30P1C025T211	0,25	210	30	38,6	31,30	14,37	1	23,61	10,84	25,21	50,1	0,4	7,27	14,5
DBCC-F50P1C025T211	0,25	210	50	55,1	44,69	20,51	1	23,61	10,84	31,35	62,4	0,4	8,24	13,2
DBCC-F70P1C025T212	0,25	210	70	70,5	57,20	26,26	1	23,61	10,84	37,09	73,8	0,5	10,40	14,1
DBCC-F90P1C025T212	0,25	210	90	93,9	76,11	34,94	1	23,61	10,84	45,77	91,1	0,7	14,55	16,0
DBCC-F100P1C025T213	0,25	210	100	103,5	83,93	38,52	1	23,61	10,84	49,36	98,2	0,9	17,67	18,0

APÊNDICE II – Parâmetros do Simplify3D para as amostras

FFF Settings

Process Name:

Select Profile:

General Settings

Infill Percentage: Include Raft Generate Support

Extruder Layer Additions Infill Support Temperature Cooling G-Code Scripts Speeds Other **Advanced**

Layer Modifications

Start printing at height mm

Stop printing at height mm

Thin Wall Behavior

External Thin Wall Type:

Internal Thin Wall Type:

Allowed perimeter overlap: %

Single Extrusions

Minimum Extrusion Length: mm

Minimum Printing Width: %

Maximum Printing Width: %

Endpoint Extension Distance: mm

Ooze Control Behavior

Only retract when crossing open spaces

Force retraction between layers

Minimum travel for retraction mm

Perform retraction during wipe movement

Only wipe extruder for outer-most perimeters

Movement Behavior

Avoid crossing outline for travel movements

Maximum allowed detour factor:

Slicing Behavior

Non-manifold segments: Discard Heal

Merge all outlines into a single solid model

FFF Settings

Process Name:

Select Profile:

General Settings

Infill Percentage: Include Raft Generate Support

Extruder Layer Additions **Infill** Support Temperature Cooling G-Code Scripts Speeds Other Advanced

General

Infill Extruder:

Internal Fill Pattern:

External Fill Pattern:

Interior Fill Percentage: %

Outline Overlap: %

Infill Extrusion Width: %

Minimum Infill Length: mm

Combine Infill Every: layers

Include solid diaphragm every layers

Internal Infill Angle Offsets

deg

Print every infill angle on each layer

External Infill Angle Offsets

deg

FFF Settings

Process Name:

Select Profile:

General Settings

Infill Percentage: Include Raft Generate Support

Extruder Layer Additions Infill Support Temperature Cooling G-Code Scripts Speeds Other Advanced

Layer Settings

Primary Extruder:

Primary Layer Height: mm

Top Solid Layers:

Bottom Solid Layers:

Outline/Perimeter Shells:

Outline Direction: Inside-Out Outside-In

Print islands sequentially without optimization

Single outline corkscrew printing mode (vase mode)

First Layer Settings

First Layer Height: %

First Layer Width: %

First Layer Speed: %

Start Points

Use random start points for all perimeters

Optimize start points for fastest printing speed

Choose start point closest to specific location

X: Y:

FFF Settings

Process Name:

Select Profile:

General Settings

Infill Percentage: Include Raft Generate Support

Extruder Layer Additions Infill Support Temperature Cooling G-Code Scripts Speeds Other Advanced

Support Material Generation

Generate Support Material

Support Extruder:

Support Infill Percentage: %

Extra Inflation Distance: mm

Support Base Layers:

Combine Support Every: layers

Dense Support

Dense Support Extruder:

Dense Support Layers:

Dense Infill Percentage: %

Automatic Placement

Only used if manual support is not defined

Support Type:

Support Pillar Resolution: mm

Max Overhang Angle: deg

Separation From Part

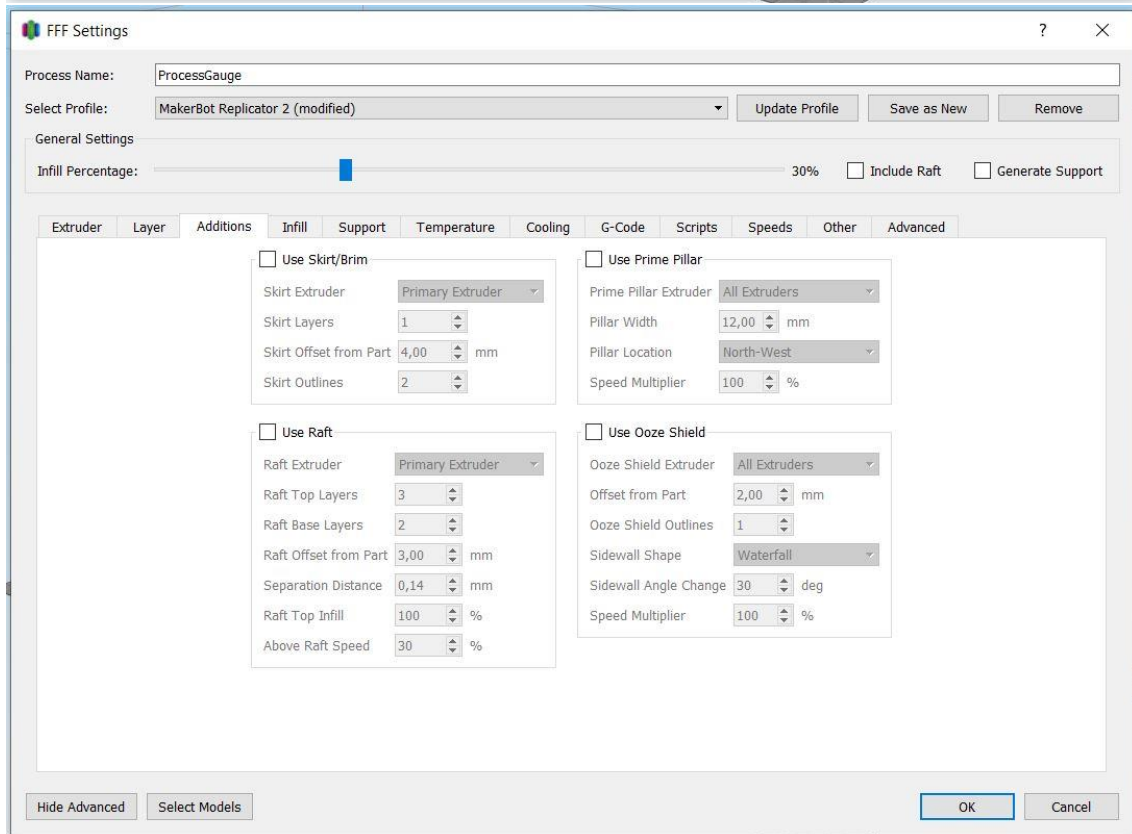
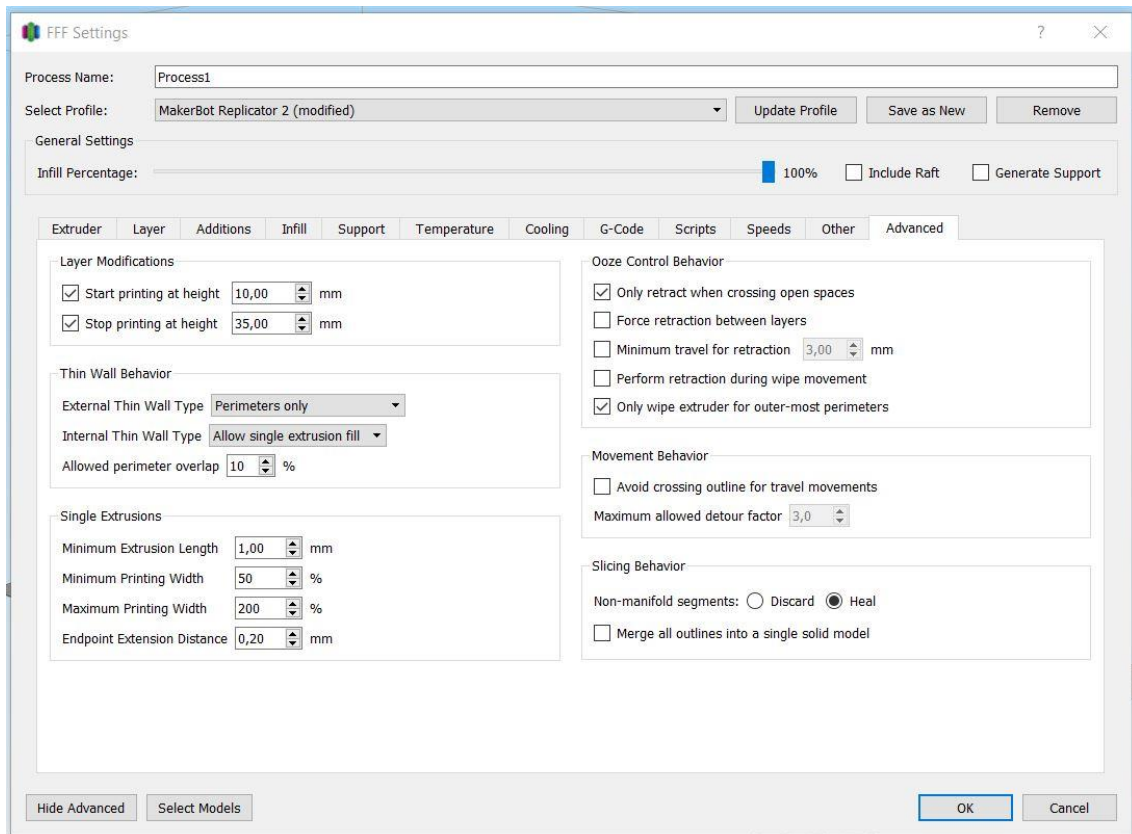
Horizontal Offset From Part: mm

Upper Vertical Separation Layers:

Lower Vertical Separation Layers:

Support Infill Angles

deg



FFF Settings

Process Name:

Select Profile:

General Settings

Infill Percentage: Include Raft Generate Support

Extruder Layer Additions Infill Support Temperature Cooling G-Code Scripts Speeds Other **Advanced**

Layer Modifications

Start printing at height mm

Stop printing at height mm

Thin Wall Behavior

External Thin Wall Type

Internal Thin Wall Type

Allowed perimeter overlap %

Single Extrusions

Minimum Extrusion Length mm

Minimum Printing Width %

Maximum Printing Width %

Endpoint Extension Distance mm

Ooze Control Behavior

Only retract when crossing open spaces

Force retraction between layers

Minimum travel for retraction mm

Perform retraction during wipe movement

Only wipe extruder for outer-most perimeters

Movement Behavior

Avoid crossing outline for travel movements

Maximum allowed detour factor

Slicing Behavior

Non-manifold segments: Discard Heal

Merge all outlines into a single solid model

FFF Settings

Process Name:

Select Profile:

General Settings

Infill Percentage: Include Raft Generate Support

Extruder Layer Additions Infill Support Temperature **Cooling** G-Code Scripts Speeds Other Advanced

Per-Layer Fan Controls

Layer	Fan Speed
1	0
2	100

Layer Number

Fan Speed %

Fan Options

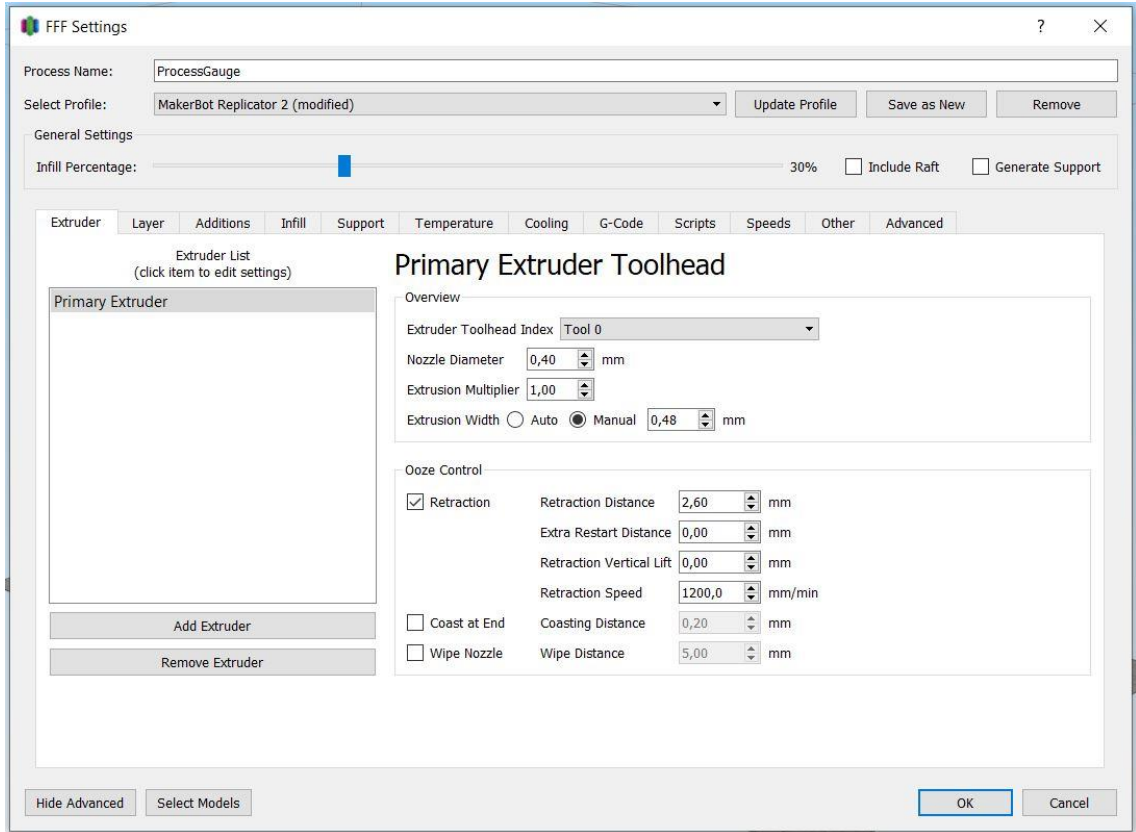
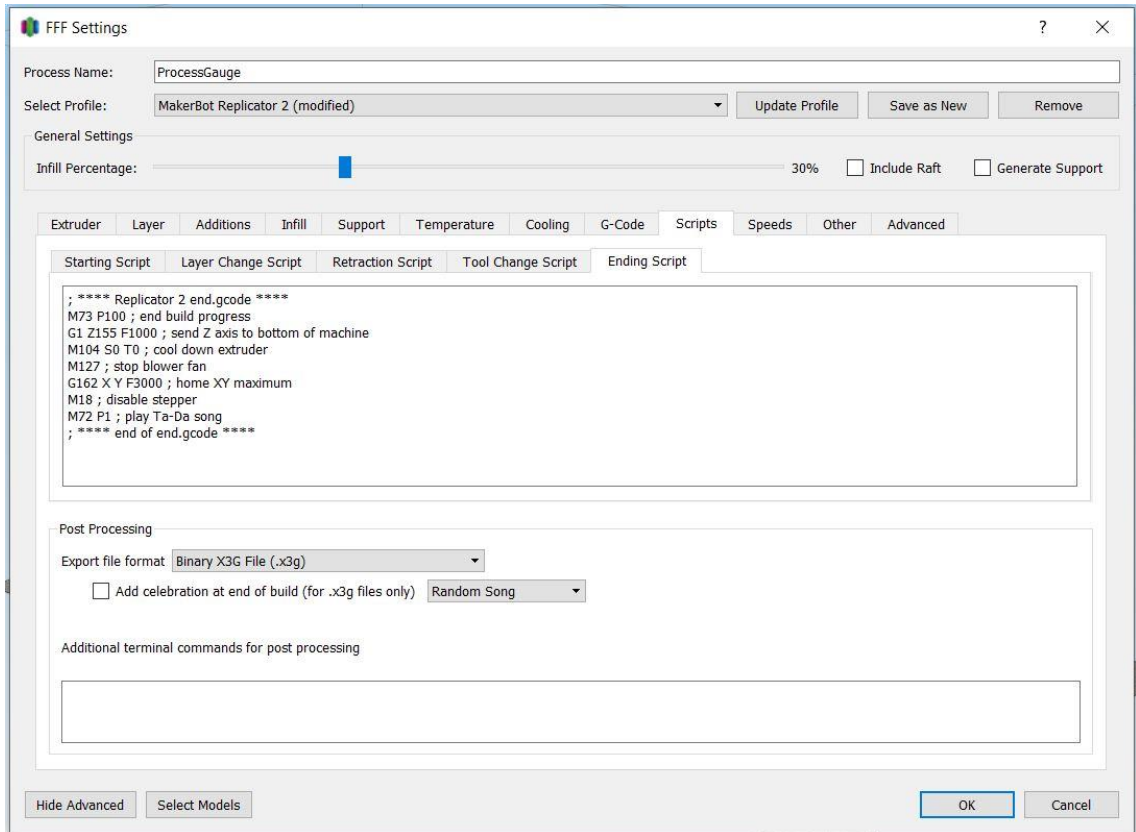
Blip fan to full power when increasing from idle

Fan Overrides

Increase fan speed for layers below sec

Maximum cooling fan speed %

Bridging fan speed override %



FFF Settings

Process Name:

Select Profile:

General Settings

Infill Percentage: 30% Include Raft Generate Support

Extruder Layer Additions Infill Support Temperature Cooling G-Code Scripts Speeds Other Advanced

G-Code Options

- 5D firmware (include E-dimension)
- Relative extrusion distances
- Allow zeroing of extrusion distances (i.e. G92 E0)
- Use independent extruder axes
- Include M101/M102/M103 commands
- Firmware supports "sticky" parameters
- Apply toolhead offsets to G-Code coordinates

Global G-Code Offsets

	X-Axis	Y-Axis	Z-Axis
Offset	<input type="text" value="0,00"/> mm	<input type="text" value="0,00"/> mm	<input type="text" value="0,00"/> mm

Update Machine Definition

Machine type:

	X-Axis	Y-Axis	Z-Axis
Build volume	<input type="text" value="280,0"/> mm	<input type="text" value="150,0"/> mm	<input type="text" value="150,0"/> mm
Origin offset	<input type="text" value="140,0"/> mm	<input type="text" value="75,0"/> mm	<input type="text" value="0,0"/> mm
Homing dir	<input type="text" value="Max"/>	<input type="text" value="Max"/>	<input type="text" value="Min"/>
Flip build table axis	<input type="checkbox"/> X	<input checked="" type="checkbox"/> Y	<input type="checkbox"/> Z
Toolhead offsets	<input type="text" value="Tool 0"/> X <input type="text" value="0,00"/> Y <input type="text" value="0,00"/>		

Update Firmware Configuration

Firmware type:

GPX profile:

Baud rate: bits/sec

FFF Settings

Process Name:

Select Profile:

General Settings

Infill Percentage: 30% Include Raft Generate Support

Extruder Layer Additions Infill Support Temperature Cooling G-Code Scripts Speeds Other Advanced

General

Infill Extruder:

Internal Fill Pattern:

External Fill Pattern:

Interior Fill Percentage: %

Outline Overlap: %

Infill Extrusion Width: %

Minimum Infill Length: mm

Combine Infill Every: layers

Include solid diaphragm every layers

Internal Infill Angle Offsets

deg

Print every infill angle on each layer

External Infill Angle Offsets

deg

FFF Settings

Process Name:

Select Profile:

General Settings

Infill Percentage: Include Raft Generate Support

Extruder Layer Additions Infill Support Temperature Cooling G-Code Scripts Speeds Other Advanced

Layer Settings

Primary Extruder:

Primary Layer Height: mm

Top Solid Layers:

Bottom Solid Layers:

Outline/Perimeter Shells:

Outline Direction: Inside-Out Outside-In

Print islands sequentially without optimization

Single outline corkscrew printing mode (vase mode)

First Layer Settings

First Layer Height: %

First Layer Width: %

First Layer Speed: %

Start Points

Use random start points for all perimeters

Optimize start points for fastest printing speed

Choose start point closest to specific location

X: Y: mm

FFF Settings

Process Name:

Select Profile:

General Settings

Infill Percentage: Include Raft Generate Support

Extruder Layer Additions Infill Support Temperature Cooling G-Code Scripts Speeds Other Advanced

Bridging

Unsupported area threshold: sq mm

Extra inflation distance: mm

Bridging extrusion multiplier: %

Bridging speed multiplier: %

Use fixed bridging infill angle deg

Apply bridging settings to perimeters

Dimensional Adjustments

Horizontal size compensation: mm

Filament Properties

Filament Toolhead Index:

Filament diameter: mm

Filament price: price/kg

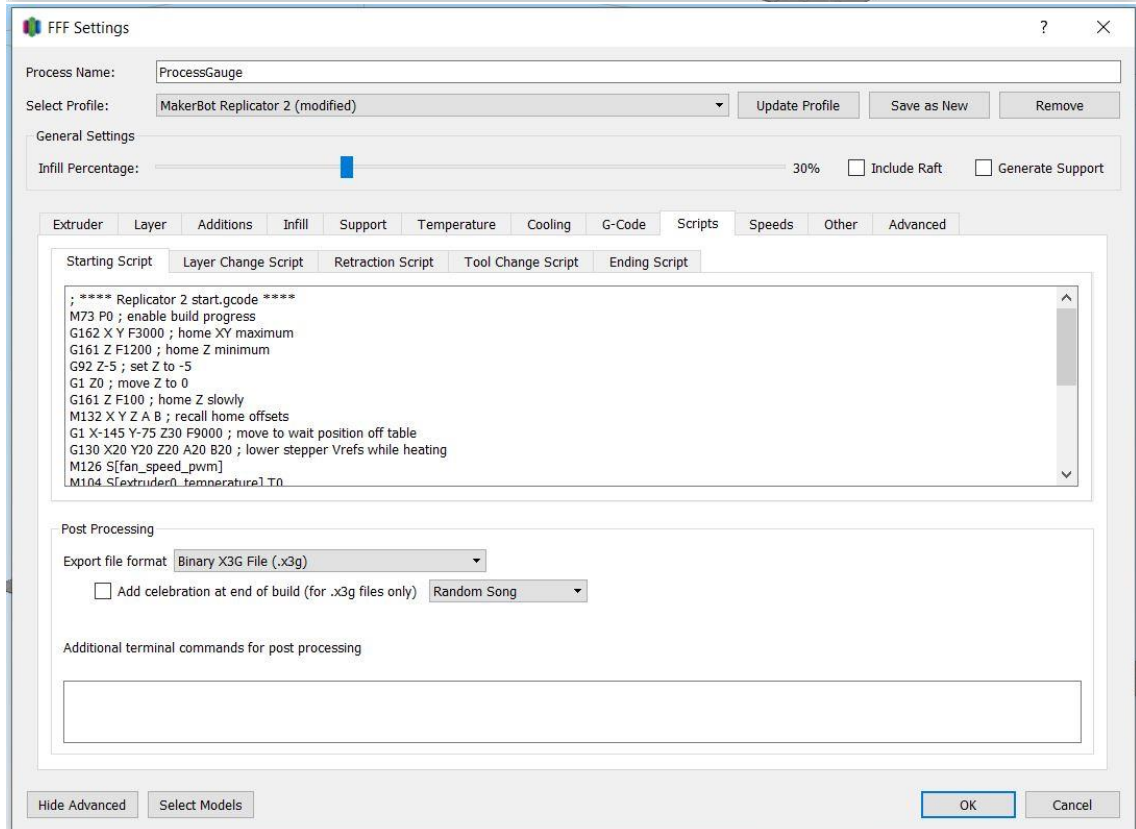
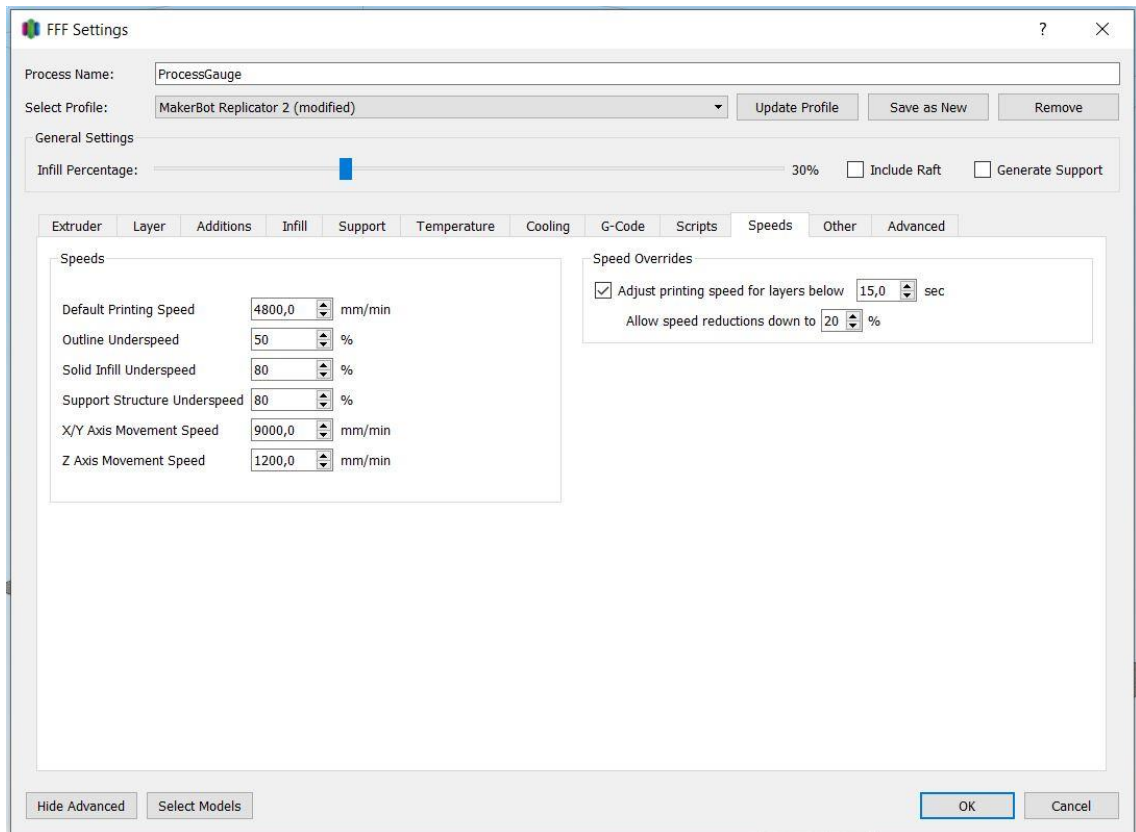
Filament density: grams/cm³

Tool Change Retraction

Tool change retraction distance: mm

Tool change extra restart distance: mm

Tool change retraction speed: mm/min



FFF Settings

Process Name:

Select Profile:

General Settings

Infill Percentage: 30% Include Raft Generate Support

Extruder Layer Additions Infill Support Temperature Cooling G-Code Scripts Speeds Other Advanced

Support Material Generation

Generate Support Material

Support Extruder:

Support Infill Percentage: %

Extra Inflation Distance: mm

Support Base Layers:

Combine Support Every: layers

Dense Support

Dense Support Extruder:

Dense Support Layers:

Dense Infill Percentage: %

Automatic Placement

Only used if manual support is not defined

Support Type:

Support Pillar Resolution: mm

Max Overhang Angle: deg

Separation From Part

Horizontal Offset From Part: mm

Upper Vertical Separation Layers:

Lower Vertical Separation Layers:

Support Infill Angles

deg

FFF Settings

Process Name:

Select Profile:

General Settings

Infill Percentage: 30% Include Raft Generate Support

Extruder Layer Additions Infill Support Temperature Cooling G-Code Scripts Speeds Other Advanced

Temperature Controller List
(click item to edit settings)

Primary Extruder

Primary Extruder Temperature

Overview

Temperature Identifier:

Temperature Controller Type: Extruder Heated build platform

Wait for temperature controller to stabilize before beginning build

Per-Layer Temperature Setpoints

Layer	Temperature
1	220

Layer Number:

Temperature: °C

FFF Settings

Process Name:

Select Profile:

General Settings

Infill Percentage: 100% Include Raft Generate Support

Extruder Layer Additions Infill Support Temperature Cooling G-Code Scripts Speeds Other Advanced

Layer Settings

Primary Extruder:

Primary Layer Height: mm

Top Solid Layers:

Bottom Solid Layers:

Outline/Perimeter Shells:

Outline Direction: Inside-Out Outside-In

Print islands sequentially without optimization

Single outline corkscrew printing mode (vase mode)

First Layer Settings

First Layer Height: %

First Layer Width: %

First Layer Speed: %

Start Points

Use random start points for all perimeters

Optimize start points for fastest printing speed

Choose start point closest to specific location

X: Y: mm

APÊNDICE III – Firmware da Máquina de Teste

```
// Firmware para o arduino Duemilanove da
// Maquina de Teste (UTM)

// V3 - Com o CELULA DE CARGA como Extensometro
// V4 - Com configuração remota dos HTX711 e seleção de extensometro - Uso
da EEPROM
// V5 - Com alteração da seleção do periodo e duty cycle do motor

//#include <Hx711.h>

/*
 * comandos via serial
 * inverte o estado do led conectado a saída 13 do arduino quando recebe o
caracter 'A' pela serial
 */
#include <Hx711.h>
#include <TimerOne.h>
#include <EEPROM.h>

Hx711 scale(A1, A0); //Leitor da celula de carga
Hx711 scale2(A3, A2); //Leitor do extensometro

int dtc=1023; //duty cycle
long periodo = 2000; // define a frequencia do PWM (microsegundos) 500HZ
//variaveis parte leitura loadcell
const int LED = 13;
const int RELAY1 = 12;
const int RELAY2 = 5;
const int ESTOP1 = 7;
const int ESTOP2 = 10;
const int MOTOR = 9;
int valor_AD = 0;
int valor_leituras = 0;
byte i = 0;

// variaveis para leitura da temperatura e humidade
int DHpin = 8;
byte dat [5];

//variaveis parte leitura caliper
int j;
char modo = "N";
long value;
long soma;
int contador=0;
float soma2;
unsigned long previousMillis=0;
unsigned long currentMillis;
unsigned long inicioMillis;
int delaytime =50;

// variáveis V4
//int i;
String inString = ""; // string to hold input
String sString = ""; // string to hold input
String vString = ""; // string to hold input value

char pChar = "";
char wChar = "";
int k;
int iChar;
int iCount;
int iCell;

struct LoadCell {
```

```

    long offsetValue;
    float scaleValue;
    int loadCellId;
};

String sParams[3];

LoadCell celln1;
LoadCell cellX;

void setup() {
  Serial.begin(9600);    //configura comunicação serial com 9600 bps
  pinMode(LED,OUTPUT);  //configura pino do led como saída
  pinMode(RELAY1,OUTPUT); //configura pino do RELÊ como saída
  pinMode(RELAY2,OUTPUT); //configura pino do RELÊ como saída

  digitalWrite(RELAY1,HIGH);
  digitalWrite(RELAY2,HIGH);

  pinMode(ESTOP1,INPUT);
  pinMode(ESTOP2,INPUT);

  pinMode(9, OUTPUT);

  //hX711 - 1 - celula de 500kg da maquina
  scale.setOffset(32165); // celula 500 (32165); //celula teste
(20365);
  scale.setScale(8.928); // celula 500 (8.928); //celula teste
(2987.75);

  k = leCellAtual();
  lerCellEEPROM(k);
  scale2.setOffset(cellX.offsetValue);
  scale2.setScale(cellX.scaleValue);

  //hX711 - 2 Celula de 0-500 g
  //scale2.setOffset(732594); // 561102
  //scale2.setScale(3414.05); //2612.458;

  // Timer1.initialize(500000);

  pinMode (DHpin, OUTPUT);

  //start_test (); //TEMPERATURA E HUMIDADE
} //FIM DO SETUP

void loop() {
  //Espera o teclado mandar o código 10, que é a tecla ENTER
  //Colocar input do monitor serial em newline
  while(Serial.available() > 0) {
    int inChar = Serial.read(); //lê o incoming byte:
    if (inChar != 10) {
      // Enquanto o byte que chega pela serial
      // não for um newline,
      // converte o byte recebido para char
      // e concatena ao string
      inString += (char)inChar;
    }
    else
    {
      //string completado
      if(inString.length() > 1) //se o string tiver mais de um caracter
      {
        pChar=inString.charAt(0); //pega o primeiro caracter do string e
coloca em uma variável tipo char
        vString= inString.substring(1); //pega o restante do string
        iCount = StringSplit(vString,',',sParams,3);
      }
      else //se o string for de apenas um caracter
      {

```

```

    pChar = inString.charAt(0);    // coloca va variável tipo char
  }
  // limpa o string para novo input:
  inString = "";
}
} // FIM do while
//Aqui começa o tratamento dos comandos recebidos através de letras
//Cada letra é um comando. Pode ser seguido de um número.
//Neste ponto, o código acima já separou a letra do comando (pChar)
//e o valor associado (vString), na forma de string.
switch(pChar) //verifica qual caracter recebido
{
  case 'L':                //led
  case 'l':
    digitalWrite(LED,!digitalRead(LED)); //inverte estado do LED
    break;

  case 'T':                //lê a celula de carga e a elongação
  case 't':
    //tempo em milisegundos
    Serial.print(millis()-inicioMillis);
    Serial.print("|");
    //Tração
    Serial.print(scale.getGram());
    Serial.print("|");
    //elongação
    Serial.println(scale2.getGram());
    break;

  case 'M':                //liga o motor por um instante
  case 'm':
    for(int k=0;k<10;k++){
      digitalWrite(9, HIGH);
      delay(10);
      digitalWrite(9, LOW);
      delay(10);
    }
    break;
  case 'I':                //Inicializa o Timer do PWM
  case 'i':
    Timer1.initialize(periodo);
    break;
  case 'X':                //comando x até 0 ajusta o duty cycle do PWM
  case 'x':
    dtc=256;
    Timer1.pwm(9,dtc,periodo);
    break;
  case 'Y':
  case 'y':
    dtc=512;
    Timer1.pwm(9,dtc,periodo);
    break;
  case '1':
    dtc=128;
    Timer1.pwm(9,dtc,periodo);
    break;
  case '2':
    dtc=256;
    Timer1.pwm(9,dtc,periodo);
    break;
  case '3':
    dtc=384;
    Timer1.pwm(9,dtc,periodo);
    break;
  case '5':
    dtc=512;
    Timer1.pwm(9,dtc,periodo);
    break;
  case '6':
    dtc=640;

```

```

    Timer1.pwm(9, dtc, periodo);
break;
case '7':
    dtc=768;
    Timer1.pwm(9, dtc, periodo);
break;
case '8':
    dtc=896;
    Timer1.pwm(9, dtc, periodo);
break;
case '9':
    dtc=1023;
    Timer1.pwm(9, dtc, periodo);
break;
case '0':
    dtc=0;
    Timer1.pwm(9, 0, periodo);
break;
case 'E':          //lê o estado do end-stop 1
case 'e':
    //Serial.print("e");
    Serial.println(digitalRead(ESTOP1));
break;

case 'F':          //lê o estado do end-stop 2
case 'f':
    // Serial.print("f");
    Serial.println(digitalRead(ESTOP2));
break;

case 'U':          //Motor CCW
case 'u':
    Timer1.pwm(9, 0, periodo);
    digitalWrite(RELAY1, HIGH);
    digitalWrite(RELAY2, LOW);
    Timer1.pwm(9, dtc, periodo);
    inicioMillis = millis();
break;

case 'D':          //Motor CW
case 'd':
    Timer1.pwm(9, 0, periodo);
    digitalWrite(RELAY1, LOW);
    digitalWrite(RELAY2, HIGH);
    Timer1.pwm(9, dtc, periodo);
    inicioMillis = millis();
break;

case 'Z':          //Motor Parar
case 'z':
    Timer1.pwm(9, 0, periodo);
    delay(1000);
    digitalWrite(RELAY1, HIGH);
    delay(1000);
    digitalWrite(RELAY2, HIGH);
    inicioMillis = millis();
break;

case 'Q':          //Motor Parar
case 'q':
    digitalWrite(RELAY1, LOW);
    digitalWrite(RELAY2, LOW);
    inicioMillis = millis();
break;

case 'J':          //Inicializa tempo
case 'j':
    inicioMillis = millis();
break;

```

```

case 'B':          //lê o extensômetro
case 'b':
  soma2=0;
  contador++;
  for(i=1;i<11;i++){
    soma2=soma2+scale2.getGram();
    delay(10);
  }
  Serial.print(contador);
  Serial.print("|");
  //Tração
  Serial.print(scale2.getGram());
  Serial.print("|");
  //elongação
  Serial.println(soma2/10.0);
  break;

case 'W':          //Cell Configuracao - Wn onde n representa: 1
- Celula de carga,
case 'w':          // 2 - Extensometro 500gr e 3 - extensometro
100g
  modo = 'W';
  Serial.print("***** Altera a célula a ser testada
***** ");
  Serial.print(modo);
  Serial.print("|");
  // Serial.print("substring: ");
  // Serial.println(vString);
  wChar = "";
  if(vString.length() > 0) //É esperado apenas um dígito
numérico
  {
    wChar=vString.charAt(0);
    // Serial.print("wChar: ");
    // Serial.print(wChar);
    iChar = wChar - '0';
    lerCellEEPROM(iChar); //lê na EEPROM os valores
correspondente a celula iChar.
    scale2.setOffset(cellX.offsetValue);
    scale2.setScale(cellX.scaleValue);
    salvaCelAtual(iChar);
    //Serial.print("Ajustado para a célula: ");
    Serial.print(cellX.loadCelId);
    Serial.print("|");
    Serial.print(cellX.offsetValue);
    Serial.print("|");
    Serial.println(cellX.scaleValue);
  }
  else
  {
    k = leCellAtual();
    //Serial.print("Célula atual: ");
    Serial.print(cellX.loadCelId);
    Serial.print("|");
    Serial.print(cellX.offsetValue);
    Serial.print("|");
    Serial.println(cellX.scaleValue);
  }
  vString="";
  break;

case 'A':          //Lê célula atual
case 'a':
  modo = 'A';
  //Serial.print("***** Lê célula Atual ***** ");
  Serial.print(modo);
  Serial.print("|");
  k = leCellAtual();
  //Serial.print("Célula atual: ");
  //Serial.print(k);

```

```

        //Serial.print("|");
        //Serial.println("Dados da célula: ");
        Serial.print(cellX.loadCelId);
        Serial.print("|");
        Serial.print(cellX.offsetValue);
        Serial.print("|");
        Serial.println(cellX.scaleValue);
        break;

celula case 'R': //EEPROM Read - Rn onde n é o ID da
case 'r': // 1 - carga, 2- Ext 500g, 3- Ext 100g
        modo = 'R';
        //Serial.print("***** EEPROM Read ***** ");
        Serial.print(modo);
        Serial.print("|");
        wChar = "";
        if(vString.length() > 0)
        {
            wChar=vString.charAt(0);
            //Serial.print("wChar: ");
            //Serial.println(wChar);
            iChar = wChar - '0';
            if(iChar >0)
            {
                //Serial.print("iChar: ");
                //Serial.println(iChar);
                lerCellEEPROM(iChar);
                //Serial.print("Info da célula: ");
                Serial.print(cellX.loadCelId);
                Serial.print("|");
                Serial.print(cellX.offsetValue);
                Serial.print("|");
                Serial.println(cellX.scaleValue);
            }
            else
            {
                int x;
                int eeAddress = 0; //EEPROM address to start reading from
                EEPROM.get(eeAddress, x);
                //Serial.print("ID da célula atual: ");
                Serial.println(x);
            }
        } //fim do if (vString.length() > 0
        vString="";
        break;

        case 'K': //Lê a célula de carga
        case 'k':
            //Serial.print("k");
            Serial.println(scale.getGram());
            break;
        case 'P':
        case 'p':
            //Serial.print("p");
            Serial.println(analogRead(A2)); //lê o potenciometro
            break;

        case 'G': //EEPROM Write - Escreve na eeprom os
valores de Offset e Scale e ID da cell.
        case 'g': // para as diversas células (cellnM onde
M=1, carga; 2-Ext 500g e 3-Ext 100g
            modo = 'G';
            ///Serial.print("***** EEPROM Escreve ***** ");
            Serial.print(modo);
            Serial.print("|");
            iCell = sParams[2].toInt();
            celln1 = {
                sParams[0].toInt(),
                sParams[1].toFloat(),

```



```

        iCell
    };
    //Serial.println("Após carregar valores");
    Serial.print(celln1.offsetValue);
    Serial.print("|");
    Serial.print(celln1.scaleValue);
    Serial.print("|");
    Serial.println(celln1.loadCelId);
    // Salva os valorexzs passados para a posição da EEPROM
correspondente ao ID passado * comprimento de celln1
    // Use o comando wn para colocar a celula de ID n como atual
    salvaCellEEPROM(iCell);
    break;

case 'C':          //OBTEM VALOR PARA CALIBRACAO
case 'c':          //OBTEM VALOR PARA CALIBRACAO
    Serial.println("Mantenha a célula de carga sem nenhuma massa.");
    Serial.println(" sem nenhuma carga");
    Serial.println("Anote o valor do offset.");
    Serial.println("Coloque uma carga X conhecida em gramas");
    Serial.println("Tecle de novo o comando C");
    Serial.println("Anote o valor W");
    Serial.println("Calcule: Scale = (W - offset)/X ");
    Serial.println("Aguarde ...");
    value = 0;
    soma = 0;
    for(int k=0;k<10;k++){
        value = scale.averageValue();
        //Serial.println(scale.averageValue());
        //Serial.print("c");
        Serial.println(value);
        soma = soma+value;
        delay(200);
    }
    Serial.print("media = ");
    Serial.println(soma/10);
    break;

case 'H':
case 'h':
    start_test (); //TEMPERATURA E HUMIDADE

    //Serial.print ("Current humdity =");
    Serial.print (dat [0], DEC); // display the humidity-bit
integer;

    Serial.print ('.');
    Serial.print (dat [1], DEC); // display the humidity decimal
places;

    Serial.print ('|');
    //Serial.print ("Current temperature =");
    Serial.print (dat [2], DEC); // display the temperature of
integer bits;

    Serial.print ('.');
    Serial.println (dat [3], DEC); // display the temperature of
decimal places;
    //Serial.println ('C');
    //delay (700);
    break;
    }
    pChar="";
//    } FIM do While
} // FIM do loop()

void calibracao(){
    for(int k=0;k<10;k++){
        Serial.println(scale.averageValue());
        delay(200);
    }
}

```

```

//Sensor de Temperatura e Humidade
byte read_data () {
  byte data;
  for (int i = 0; i < 8; i ++) {
    if (digitalRead (DHpin) == LOW) {
      while (digitalRead (DHpin) == LOW); // wait for 50us
      delayMicroseconds (30); // determine the duration of the high level
to determine the data is '0 'or '1'
      if (digitalRead (DHpin) == HIGH)
        data |= (1 << (7-i)); // high front and low in the post
      while (digitalRead (DHpin) == HIGH); // data '1 ', wait for the next
one receiver
    }
  }
  return data;
}

void start_test () {
  digitalWrite (DHpin, LOW); // bus down, send start signal
  delay (30); // delay greater than 18ms, so DHT11 start signal can be
detected
  digitalWrite (DHpin, HIGH);
  delayMicroseconds (40); // Wait for DHT11 response
  pinMode (DHpin, INPUT);
  while (digitalRead (DHpin) == HIGH);
  delayMicroseconds (80); // DHT11 response, pulled the bus 80us
  if (digitalRead (DHpin) == LOW);
  delayMicroseconds (80); // DHT11 80us after the bus pulled to start
sending data
  for (int i = 0; i < 4; i ++) // receive temperature and humidity data,
the parity bit is not considered
    dat[i] = read_data ();
  pinMode (DHpin, OUTPUT);
  digitalWrite (DHpin, HIGH); // send data once after releasing the bus,
wait for the host to open the next Start signal
}

void salvaCellEEPROM(int x)
{
  int eeAddress = 3 + sizeof(celln1)*(x-1);
  EEPROM.put(eeAddress, celln1);
}

// No endereço 0 está o índice da célula atual para o extensometro
void salvaCelAtual(int x)
{
  int eeAddress = 0;
  EEPROM.put(eeAddress, x);
}

int leCellAtual()
{
  int x;
  int eeAddress = 0; //EEPROM address to start reading from
  EEPROM.get(eeAddress, x);
  eeAddress = 3+ (x-1) * sizeof(cellX); //EEPROM address to start reading
from
  EEPROM.get(eeAddress, cellX);
  return x;
}

void lerCellEEPROM(int x)
{
  int eeAddress = 3+ (x-1) * sizeof(cellX); //EEPROM address to start
reading from
  EEPROM.get(eeAddress, cellX);
}

```

```

// The function is StringSplit() parse a String sLine =
"1.12345,4.56789,hello" to 3 Strings sParams[0]="1.12345",
sParams[1]="4.56789" & sParams[2]="hello".
// String sInput: the input lines to be parsed,
// char cDelim: the delimiter character between parameters,
// String sParams[]: the output array of parameters,
// int iMaxParams: the maximum number of parameters,
// Output int: the number of parsed parameters,
// The function is based on String::indexOf() and String::substring() :
int StringSplit(String sInput, char cDelim, String sParams[], int
iMaxParams)
{
    int iParamCount = 0;
    int iPosDelim, iPosStart = 0;
    do {
        // Searching the delimiter using indexOf()
        iPosDelim = sInput.indexOf(cDelim,iPosStart);
        if (iPosDelim > (iPosStart+1)) {
            // Adding a new parameter using substring()
            sParams[iParamCount] = sInput.substring(iPosStart,iPosDelim);
            iParamCount++;
            // Checking the number of parameters
            if (iParamCount >= iMaxParams) {
                return (iParamCount);
            }
            iPosStart = iPosDelim + 1;
        }
    } while (iPosDelim >= 0);
    if (iParamCount < iMaxParams) {
        // Adding the last parameter as the end of the line
        sParams[iParamCount] = sInput.substring(iPosStart);
        iParamCount++;
    }
    return (iParamCount);
}

```


APÊNDICE IV - Planos da máquina de teste de tração

APÊNDICE V – Artigos publicados