



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

LUCAS RUZZON DE JESUS ORTEGA

**Análise da influência da orientação de deposição nas propriedades mecânicas de
peças impressas em PLA.**

Guaratinguetá

2023

LUCAS RUZZON DE JESUS ORTEGA

Análise da influência da orientação de deposição nas propriedades mecânicas de peças impressas em PLA

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador (a): Prof. Dr. Erick Siqueira Guidi

Guaratinguetá

2023

O77a	Ortega, Lucas Ruzzon de Jesus Análise da influência da orientação de deposição nas propriedades mecânicas de peças impressas em PLA / Lucas Ruzzon de Jesus Ortega – Guaratinguetá, 2022. 49 f : il. Bibliografia: f. 48-49 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2022. Orientador: Prof. Dr. Erick Siqueira Guidi 1. Impressão tridimensional. 2. Análise de elementos finitos. 3. Indústria de tecnologia de ponta. 4. Impressão 3D. I. Título. CDU 621
------	--

LUCAS RUZZON DE JESUS ORTEGA

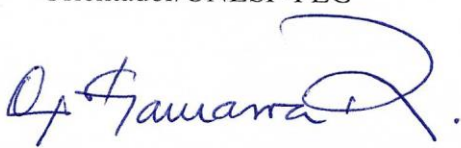
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO(A) EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. ERICK SIQUEIRA GUIDI
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. VICTOR ORLANDO GAMARRA ROSADO
UNESP-FEG


Me. GERALDO CESAR ROSÁRIO OLIVEIRA
UNESP-FEG

FEVEREIRO DE 2023

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço pela minha saúde, minha inteligência, e pelo apoio que tive durante os anos de graduação;

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Erick Siqueira Guidi* pela orientação e auxílio em cada uma das etapas do desenvolvimento do projeto, e pelo apoio a meu tema;

Aos meus pais *Rubens e Erika*, assim como meu irmão *Giovani* que apesar das dificuldades que sempre me incentivaram e lutaram pela minha educação;

Às funcionárias e funcionários da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, e vontade de ajudar, sem eles o trabalho realizado não existiria;

Aos professores e outros funcionários da Faculdade de Engenharia e Ciências da UNESP, do Campus de Guaratinguetá que se dedicaram a disseminar conhecimento e guiar o amadurecimento de nós alunos.

Aos meus amigos, que me apoiaram durante todo o período do curso.

À empresa Way Out 3D pelo fornecimento dos corpos de provas impressos em 3D.

“Não podemos resolver nossos problemas com o mesmo pensamento que tínhamos
quando os criamos”

Albert Einstein

RESUMO

Nos últimos anos a manufatura aditiva tem se tornado um assunto evidenciado, principalmente a técnica de modelagem por fusão e deposição (FDM) que se tornou acessível e de baixo custo. Portanto, entender a influência da modificação dos parâmetros de impressão nas características apresentadas pelo produto desenvolvido é de suma importância. Esse trabalho utilizou-se de ensaios mecânicos para caracterizar o material PLA e também identificar a melhor definição de sentido de deposição para obtenção das características desejadas no produto. Como análise adicional foi realizada uma simulação numérica computacional através do método dos elementos finitos com o auxílio de um software CAE. Após os ensaios observou-se que o material apresenta características muito próximas as de um material isotrópico e que os maiores valores de resistência mecânica foram obtidos nos corpos de prova impressos na direção longitudinal e os menores valores obtidos nos corpos de prova com orientação transversal. Em relação as simulações foram encontradas valores condizentes com o comportamento encontrado nos ensaios, com uma diferença de 3,25% em relação ao deslocamento, e uma diferença de 7,59% de tensão normal.

PALAVRAS-CHAVE: CAE. Manufatura Aditiva. FDM. Elementos Finitos.

ABSTRACT

In recent years the additive manufacturing has become a highlighted subject, especially the fused deposition modeling (FDM) technique, which has become accessible and low-cost. Therefore, making the understanding of the influence of the printing parameters modification on the developed product characteristics really important. This thesis used the mechanical tests to identify PLA properties and also to find the best definition of deposition direction in order to obtain the desired characteristics of the product. As an additional analysis, a computational numerical simulation was carried out using the finite element method with the use of CAE software. After the tests, it was possible to observe that the material characteristics are very similar to those of an isotropic material, best mechanical behavior was found on the sample that was printed parallel to the length of the specimen. After the CAE Simulation it was found a difference of 3.25% of elongation and a difference of 7,69% of Normal Strain.

KEYWORDS: CAE. Additive Manufacturing. FDM. Finite Elements Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -Representação das principais etapas do processo de impressão 3D	12
Figura 2 - Matriz de aplicações da AM	14
Figura 3 - Exemplo Extrusão de material.....	15
Figura 4 - Exemplo de técnica Polyjet da Stratasys Ltd. baseada em jateamento de material.	16
Figura 5 - Exemplo de técnica CJP baseada em jateamento de aglutinante.....	16
Figura 6 - Exemplo de técnica LOM baseada na laminação de chapas.	17
Figura 7 - Exemplo de LENS baseado em Deposição com Energia direcionada	18
Figura 8 - Exemplo de SLS	18
Figura 9 - Princípio do processo SLA	19
Figura 10 – Figura dos corpos de prova	21
Figura 11 - Exemplo de objeto com malhas	23
Figura 12 - Fluxograma do Projeto	24
Figura 13 - Área de Trabalho Inventor	26
Figura 14 – Corpo de Prova Condição 1 (0°)	28
Figura 15 – Corpo de Prova Condição 2 ($\pm 45^\circ$).....	28
Figura 16 – Corpo de Prova Condição 3 (0°)	28
Figura 17 – Corpo de Prova Condição 4 (Alteração de Base, 0°)	29
Figura 18 - Sentidos de Deposição escolhidos Vista superior da mesa.....	29
Figura 19 – Parâmetros de Qualidade, Parede, Material e Velocidade	30
Figura 20 – Parâmetros de Preenchimento, Trajeto e Refrigeração	31
Figura 21 – Parâmetros de Suporte e Adesão.....	31
Figura 22 - Em azul aderência Skirt.	32
Figura 23 - Especificações Técnicas inseridas no Ansys para o PLA.....	32

Figura 24 – Separação do corpo de prova em 3 sólidos	33
Figura 25 – Malha produzida no Ansys	34
Figura 26 – Elementos estáticos utilizados no Ansys	35
Figura 27 – Resultados do ensaio de tração para os CDPs Cinza	36
Figura 28 – Resultado ensaio de tração dos CDPs Amarelos.....	37
Figura 29 – Resultados do ensaio de tração para os CDPs Verdes	37
Figura 30 – Resultados dos ensaios de tração para os CDPs Azuis	38
Figura 31 - Gráfico da Tensão máxima média encontrada para cada grupo	39
Figura 32 – Gráfico da Deformação para a máxima Tensão de cada um dos grupos	39
Figura 33 - Gráfico consolidado do Módulo de Elasticidade.....	40
Figura 34 - Curva média consolidada de Força x Deslocamento	41
Figura 35 – CDPs Após o ensaio.....	42
Figura 36 - Fratura para [+45°/-45°]	43
Figura 37 - Fratura para [+45°/-45°]	43
Figura 38 - Fratura para [0°].....	43
Figura 39 - Fratura para [0°].....	43
Figura 40 – Fratura para [Base XZ 0°] à esquerda, [90° a direita].....	44
Figura 41 - Resultados da simulação para deslocamento	45
Figura 42 - Resultado da simulação para Tensão Normal.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de dimensões do corpo de prova.....	21
Tabela 2 – Tabela de Velocidade	22
Tabela 3 - Resultados obtidos nos ensaios de tração.....	38
Tabela 4 - Comparação Percentual Tensão, Deformação e Módulo de Elasticidade.....	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVO.....	11
1.2	MOTIVAÇÃO	11
1.3	ETAPAS REALIZADAS	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1	MANUFATURA ADITIVA.....	12
2.1.1	Aplicações	13
2.1.2	Métodos De Impressão.....	15
2.1.3	Materiais	19
2.2	ASTM D638.....	20
2.3	ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1	DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES	24
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS	25
3.2.1	Impressora	25
3.2.2	Insumo Utilizado	26
3.2.3	Máquina Para Ensaio De Tração	26
3.3	METODOLOGIA	26
3.3.1	Projeto Em Cad	26
3.3.2	Impressão Dos Corpos De Prova	27
3.3.3	Simulação De Elementos Finitos.....	32
4	RESULTADOS.....	36
5	CONCLUSÃO	47
	REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

Segundo Santana (2018) a impressão 3D, também chamada de Manufatura aditiva (do inglês Additive Manufacturing ou AM) pode ser definida como um processo para desenvolver objetos tridimensionais através da deposição controlada digitalmente de múltiplas camadas de material, a fim de criar uma estrutura final. Em oposição aos princípios de manufatura subtrativa.

Cardoso (2016) também demonstra a importância da manufatura aditiva na atualidade já que a mesma faz dos 9 pilares da indústria 4.0 devido a suas diversas aplicações sendo capaz de produzir desde peças de decoração até próteses cirúrgicas sem a necessidade de moldes.

De acordo com Selhorst (2008) a introdução da manufatura aditiva permitiu a criação de protótipos em horas, ao invés de dias como era antes de seu surgimento, o que permite diminuir os riscos do desenvolvimento da peça final como por exemplo a necessidade de uma análise ergonômica.

Outro detalhe importante citado por Rodrigues (2017) é que a manufatura aditiva não envolve economia de escala (não necessita escala mínima para ser economicamente viável) e também possibilita a produção de produtos local através da instalação da impressora na casa do consumidor.

Volpato (2017) evidencia que o crescimento do mercado de tecnologias AM tem sido considerável citando que entre 2007 e 2014 houve um aumento de 1 bilhão de dólares para 4 bilhões de acordo com o Wohlers Report de 2015, e esse mesmo ritmo foi mantido nos dois anos seguintes.

Santana (2018) ainda comenta que dentre as opções disponíveis no mercado, a modelagem por fusão e deposição (do inglês Fused Deposition Modeling ou FDM) é uma das técnicas mais comuns e o material Ácido Polilático (do inglês Polylactic Acid ou PLA) também é um dos mais populares por suas características biocompatíveis e biodegradáveis além de possuir propriedades mecânicas boas.

1.1 OBJETIVO

- Impressão dos corpos de prova nos diferentes sentidos de deposição
- Realização dos ensaios mecânicos nos corpos de prova
- Levantamento das curvas de escoamento
- Definir melhor sentido de deposição
- Simulação numérica computacional através do Método dos Elementos Finitos (MEF)

1.2 MOTIVAÇÃO

Conforme indicado na introdução, a alta demanda por produtos desenvolvidos com a utilização da manufatura aditiva, a acessibilidade e redução de custos envolvido e também a necessidade de melhoria evidenciada pela alta taxa de pesquisas recentes sobre o tema, tem gerado uma evolução acelerada dos métodos de impressão, e como futuro engenheiro, entender como as propriedades mecânicas são afetadas com a alteração dos parâmetros de impressão é extremamente benéfico para a formação.

1.3 ETAPAS REALIZADAS

O primeiro tópico deste trabalho (Introdução) tratou sobre a introdução ao tema, os objetivos e também a motivação.

O segundo tópico (Fundamentação teórica) abordou todos os temas envolvidos durante a execução do trabalho para facilitar o entendimento do leitor.

O terceiro tópico (Materiais e métodos) demonstrou ao leitor os instrumentos utilizados durante a execução do trabalho e também especificou a forma como o trabalho foi executado.

O quarto tópico (Resultados) identificou cada um dos resultados obtidos durante a execução.

O quinto tópico (Conclusão) apresentou a opinião do autor quanto aos resultados obtidos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MANUFATURA ADITIVA

Os processos de fabricação convencionais possuem princípios estabelecidos baseados em moldagem do material (ex.: injeção de plástico), remoção de material (ex.: usinagem), conformação (ex.: forjamento), união de componentes (ex.: Soldagem) ou divisão de componentes (ex.: serragem), enquanto a AM é um método mais recente, que consiste na adição sucessiva de material em camadas baseadas em uma representação geométrica 3D gerada por softwares CAD que posteriormente é “fatiada” em diversas camadas 2D por um software fatiador restando apenas a impressão, que seria o empilhamento dessas camadas para obtenção da peça final conforme a Figura 1. (Volpato, 2017)

Figura 1 -Representação das principais etapas do processo de impressão 3D



Fonte: Volpato (2017)

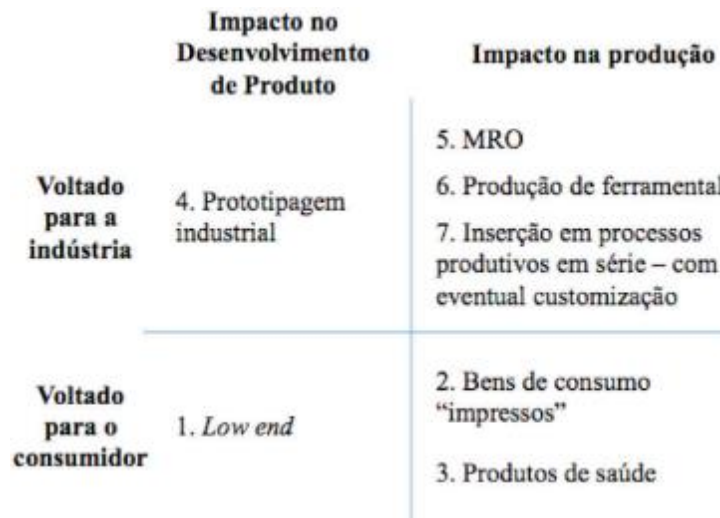
Uma descrição mais detalhada do processo é que ele funciona a partir da saída do polímero de um cartucho e entrada na máquina seguindo um trajeto que termina no aquecimento por um bico de metal a temperaturas diferentes de acordo com o polímero (para o PLA seriam 190°C). O polímero então é depositado através do bico em espessuras muito pequenas formando camadas muito finas. (Baião,2012)

A manufatura aditiva foi separada em 8 etapas (GIBSON,2015) principais para a produção de um objeto, sendo elas:

- CAD – Desenvolvimento de uma peça tridimensional utilizando softwares do tipo CAD
- Conversão para STL – Um tipo de arquivo altamente utilizado pois é compatível com a maioria das impressoras 3D atuais
- Transferência para a máquina de manufatura aditiva e manipulação do arquivo – Nesta etapa são realizadas algumas manipulações mais simples como tamanho, posição na mesa e orientação pra produção
- Configurar máquina – São ajustados os parâmetros específicos de impressão como restrições do material, fonte de energia, espessura da camada, entre outros
- Produção – Etapa praticamente automática que deve ser acompanhada ocasionalmente para evitar falta de material ou outros possíveis erros
- Remoção - Após a finalização da impressão é necessário retirar o produto da impressora.
- Pós-processamento – As limpezas necessárias após a remoção da máquina como por exemplo a retirada dos suportes.
- Aplicação – A peças está pronta pra uso, mas pode necessitar alguma finalização como por exemplo a pintura.

2.1.1 Aplicações

Rodrigues (2017), sugere a adoção de um framework que separa as aplicações da AM em 7 áreas principais conforme demonstrado na Figura 2.

Figura 2 - Matriz de aplicações da AM

Fonte: Rodrigues (2017)

1. Equipamento de baixo custo (low end) – São impressoras pequenas que podem ser armazenadas em escritórios menores ou até mesmo na casa do consumidor com baixo custo e interface simples. (Rodrigues,2017)
2. Produção de bens de consumo – Produtos finais como objetos de decoração, acessórios, brinquedos, entre outros. (Rodrigues,2017)
3. Produtos para área da saúde – A facilidade para customizar e a biocompatibilidade torna a aplicação médica uma das mais impactantes, hoje é possível imprimir implantes, próteses e até ferramentas médicas. (Rodrigues,2017)
4. Prototipagem industrial – A capacidade de alterar design com facilidade e produção em baixa escala torna a AM a técnica ideal para criação de protótipos industriais. (Rodrigues,2017)
5. MRO (manutenção, reparo e operações) – O mercado de manutenção hoje exige grandes estoques, a manufatura pode auxiliar na redução desses estoques uma vez que a produção das peças ocorre rapidamente. Uma das maiores possibilidades de aplicação é no mercado aeronáutico. (Rodrigues,2017)
6. Produção de ferramental – A AM possibilita a criação de ferramentas específicas como moldes de injeção e insertos metálicos, tal processo é denominado Ferramental Rápido (Rapid Tooling). (Rodrigues,2017)

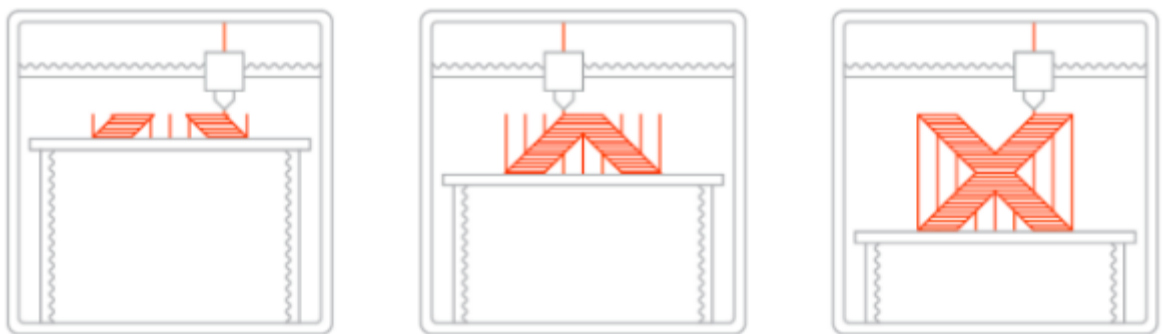
7. Inserção em processo produtivo em série com possível customização – Algumas empresas como a GE (General Electric) já estão estudando a viabilidade de produção de peças em série como por exemplo um injetor de combustível. (Rodrigues, 2017)

2.1.2 Métodos De Impressão

Segundo a norma ASTM F2792-12A, responsável pela nomenclatura dos processos de manufatura aditiva, existem 8 métodos atuais para a execução do processo de desenvolvimento do produto.

De acordo com Cruzeiro (2019) a Extrusão de material (Material Extrusion) também conhecida pela principal técnica FDM (Fused Deposition Modeling) consiste na aplicação constante de uma pressão a fim de empurrar o material por um bocal, o material está a temperaturas elevadas, portanto em um estado líquido e após ser depositado se solidifica formando um substrato. Sua principal vantagem é o custo benefício e resultados estéticos satisfatórios.

Figura 3 - Exemplo Extrusão de material



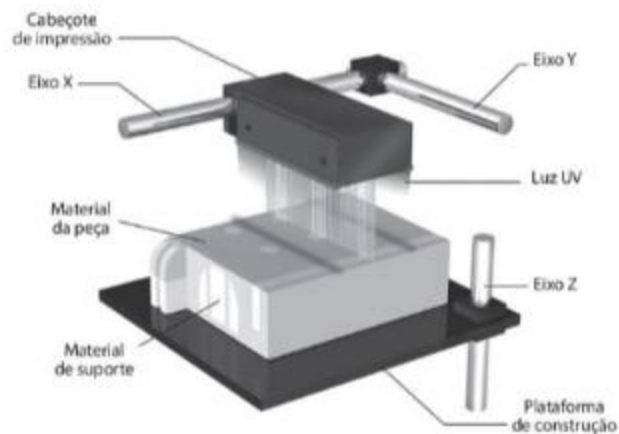
Fonte: Cruzeiro (2019)

Volpato (2017) agrupa duas tecnologias de impressão, sendo elas o jateamento de material e o Jateamento de aglutinante, ambos são derivados do jateamento de tinta de impressoras convencionais 2D.

O Jateamento de material (Material Jetting) realiza a deposição direta do material no estado líquido e é em seguida solidificado por ação física ou química, o processo então é

repetido camada a camada. Atualmente é utilizado resina acrílica para fabricação com esta técnica. (Volpato, 2017).

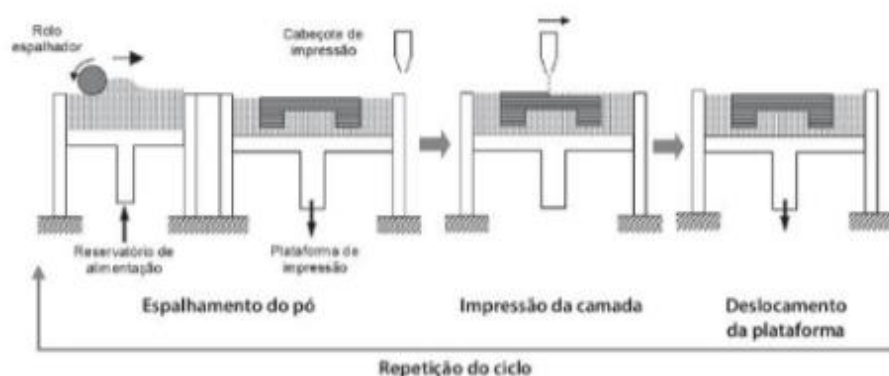
Figura 4 - Exemplo de técnica Polyjet da Stratasys Ltd. baseada em jateamento de material.



Fonte: Volpato (2017)

O Jateamento de aglutinante (Binder Jetting) de maneira similar ao que ocorre no jateamento de material, é realizada a deposição de um fluído sobre um leito de material na forma de pó, várias peças podem ser produzidas e empilhadas uma vez que o próprio pó é utilizado como suporte. Sua grande vantagem é a capacidade de utilizar a maior parte dos materiais, desde pós cerâmicos a metálicos, poliméricos e compósitos. (Volpato, 2017)

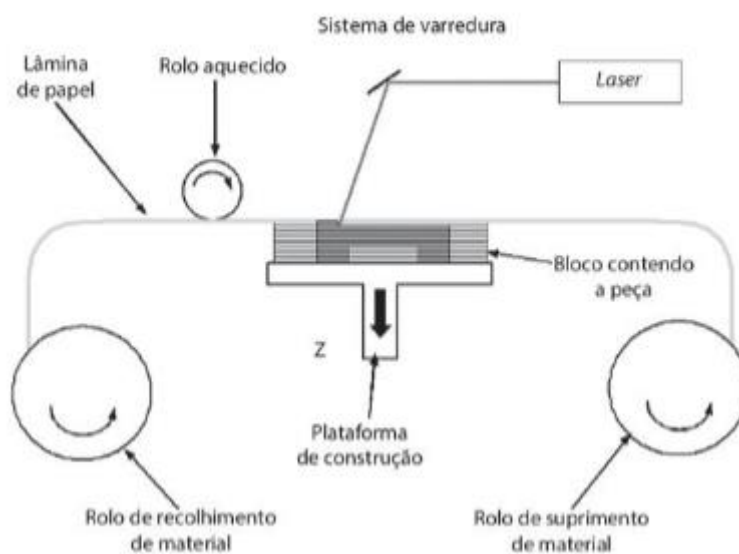
Figura 5 - Exemplo de técnica CJP baseada em jateamento de aglutinante



Fonte: Volpato (2017)

A Laminação de chapas (Sheet Lamination) é subdividida em diversos métodos, porém seu princípio é o empilhamento de chapas e posterior colagem de diferentes formas sendo a soldagem no caso dos metais, e cola no caso de papel. Esse processo geralmente necessita de um pós-processamento, como por exemplo a usinagem no caso de metais. (Volpato, 2017)

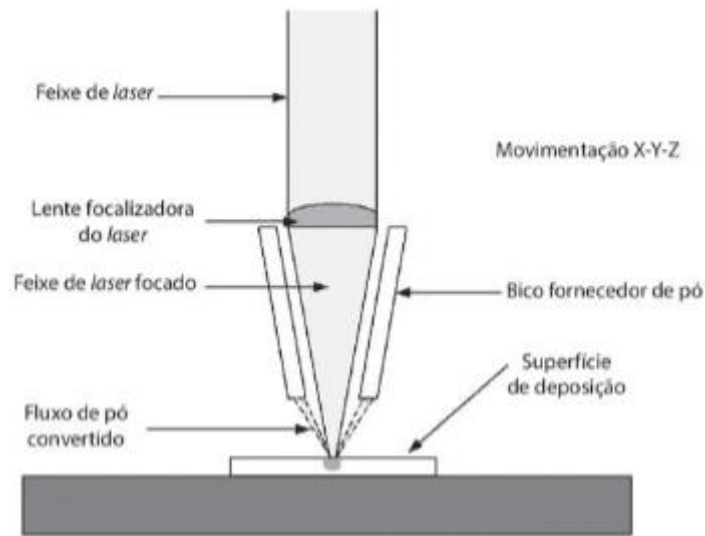
Figura 6 - Exemplo de técnica LOM baseada na laminação de chapas.



Fonte: Volpato (2017)

Volpato (2017) descreve o processo de Deposição com Energia Direcionada (Direct Energy Deposition ou DED) como a projeção do material simultânea ao uso do laser no substrato e no material adicionado, realizando a fusão e solidificação. Um dos principais processos que utiliza essa técnica é chamado LENS que deposita o pó ao mesmo tempo que o funde conforme Figura 7.

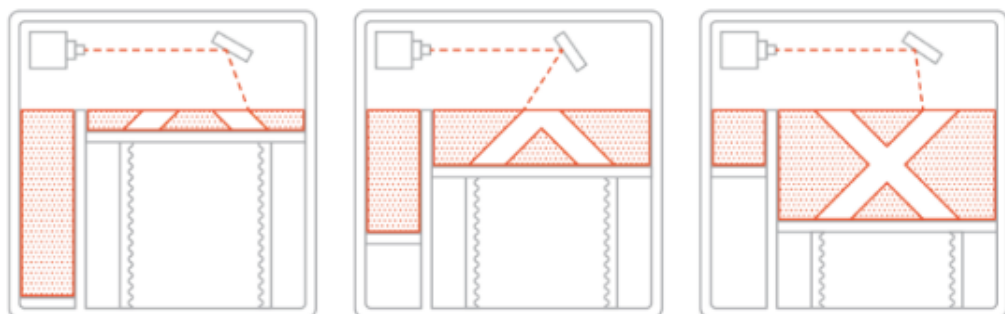
Figura 7 - Exemplo de LENS baseado em Deposição com Energia direcionada



Fonte: Volpato (2017)

De acordo com Cruzeiro (2019) a Fusão em leito de pó (Powder Bed Fusion) consiste na fusão de camadas de um pó através da utilização de energia térmica para a criação de estruturas tridimensionais, normalmente, sua principal vantagem são as propriedades mecânicas obtidas devido a sinterização, gerando peças funcionais, porém possui custo elevado e tempo necessário para produção maior que os outros métodos apresentados. Pode ser usada para impressão de metal, porém possui limitações de dimensões. A técnica mais conhecida desse método é a sinterização seletiva a laser. (Selective Laser Sintering ou SLS).

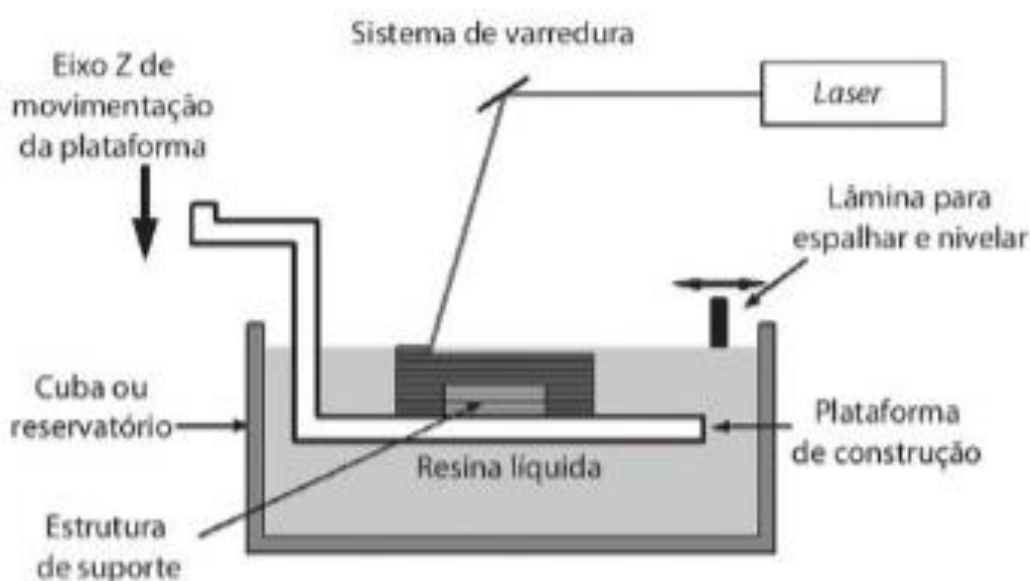
Figura 8 - Exemplo de SLS



Fonte: Cruzeiro (2019)

A Fotopolimerização em Cuba (Vat photopolymerization) é descrita por Volpato (2017) como um processo que utiliza resina polimérica em estado líquido e o solidifica através da irradiação de luz ultravioleta (UV), possui como principais vantagens a utilização de camadas micrométricas e excelente acabamento superficial. A técnica mais conhecida é a Estereolitografia (SLA) que funciona conforme exemplificado na Figura 9.

Figura 9 - Princípio do processo SLA



Fonte: Volpato (2017)

2.1.3 Materiais

Atualmente as limitações da manufatura aditiva já foram muito reduzidas. É possível criar objetos desde papel até mesmo a metais. Este tópico abordará os principais materiais utilizados para o processo de impressão 3D no método FDM e também demonstrará as qualidades e aplicações de cada um.

Segundo Kristiawan (2021) o ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene ou Acrilonitrila Butadieno Estireno) é um termo usado pra descrever diversas misturas contendo polímeros butadieno e estireno, se trata de um material amorfo, resistente a impacto e uma das maneiras de melhorar suas características mecânicas é a adição de óxido de grafeno além disso o autor

cita o material como sendo um dos dois mais conhecidos, junto com o PLA que será explicado a seguir.

O PLA (Polylactic Acid ou Ácido Polilático) é um dos materiais mais inovadores e possui diversas aplicações, é o material mais conhecido e utilizado no ramo de manufatura aditiva pois é fácil de ser impresso, possui um comportamento frágil, porém é rígido e resistente a impacto, é biodegradável, biocompatível e inodoro. (Kristiawan ,2021)

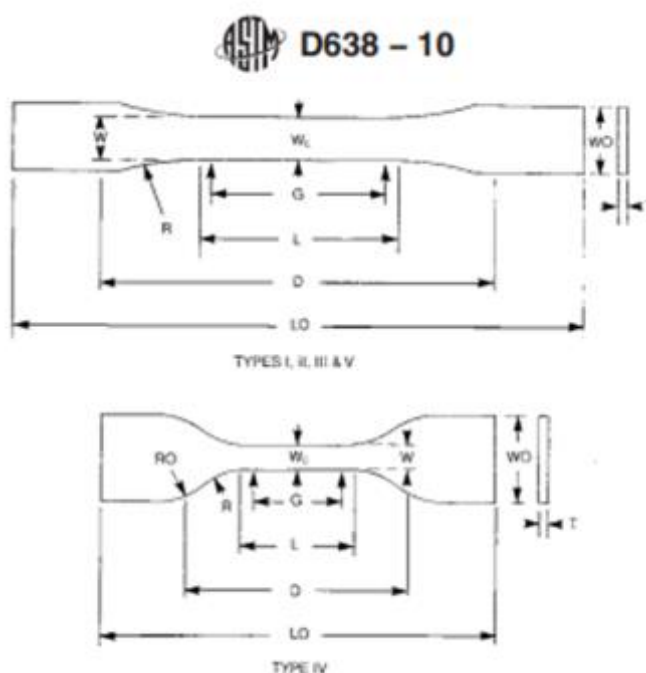
Em Rodrigues (2018) é dito que o PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol ou Polietileno Tereftalato Glicol) é muito útil quando se necessita de peças flexíveis e duráveis, além de ser transparente, e mantém características semissólidas quando aquecido.

O HIPS (High Impact Polystyrene ou Poliestireno De Alto Impacto) e o PVA (Polyvinyl Alcohol ou Poliacetato de Vinila) normalmente são utilizados apenas como suporte por serem solúveis, o PVA é solúvel em água enquanto o HIPS é solúvel em um produto químico chamado limoneno, um tipo de ácido encontrado normalmente em frutas cítricas. O HIPS normalmente é utilizado em conjunto com ABS. (GUIDE to 3D Printing Materials, 2023)

Por fim, recentemente protótipos funcionais têm sido construídos utilizando compósitos como a fibra de carbono, o kevlar e também a fibra de vidro, tais materiais possuem características de rigidez elevada e também grande resistência, normalmente só podem ser utilizados em impressoras industriais de alto custo.

2.2 ASTM D638-10

Para garantir a reprodutibilidade do projeto, a metodologia adotada segue as normas específicas para materiais poliméricos estabelecidos na ASTM D638-10, com o corpo de prova com formato de haltere e dimensões conforme ilustrados na Figura 10 associada a tabela 1, para o projeto, foi estabelecido que as dimensões seriam conforme o tipo I pois é o corpo de prova mais indicado para a situação analisada.

Figura 10 – Figura dos corpos de prova

Fonte: ASTM D638 (2014)

Tabela 1 – Tabela de dimensões do corpo de prova

Dimensões em mm (Figura 10)	Menor que 7 mm		7 a 14 mm	Menor que 4 mm		Tolerâncias
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	Tipo V	
W – Largura da menor seção	13	6	19	6	3,18	±0,5
L – Comprimento da Menor Seção	57	57	57	33	9,53	±0,5
WO – Largura Geral, min	19	19	29	19	...	+6,4
WO – Largura Geral, min	...	...	...	...	9,53	+3,18
LO – Comprimento Geral	165	183	246	115	63,5	...
G – Comprimento entre medidores	50	50	50	...	7,62	±0,25
G – Comprimento entre medidores	...	...	...	25	...	±0,13
D – Distância entre Garras	115	135	115	65	25,4	±5
R – Raio da curvatura	76	76	76	14	12,7	±1
RO – Raio Externo (Tipo IV)	...	...	...	25	...	±1

Fonte: Tradução adaptada da ASTM D638-10 (2014)

Além das dimensões do corpo de prova, a norma também especifica outras características do processo, como velocidade, quantidade de amostras e cada uma das etapas do teste. Na Tabela 2 está apresentada a tabela de velocidades apresentada na norma, é especificado que a velocidade deve ser definida como a menor velocidade em que ocorra fratura entre 30s e 5 minutos.

Após impressão dos corpos de prova é necessário seguir os parâmetros de teste indicados na norma ASTM D638-10, que define que uma das garras da máquina de teste deve ser fixa enquanto a outra precisa se mover a velocidade constante. Além disso o ferramental utilizado precisa ter um medidor de carga e de deslocamento integrado durante a realização dos testes.

Tabela 2 – Tabela de Velocidade

Classificação	Tipo	Velocidade mm/min	Taxa de deformação nominal no início do teste mm/mm.min
Rígido e Semirrígido	I, II, III e tubos	5 ± 25%	0,1
		50 ± 10%	1
		500 ± 10%	10
	IV	5 ± 25%	0,15
		50 ± 10%	1,5
		500 ± 10%	15
	V	1 ± 25%	0,1
		10 ± 25%	1
		100 ± 25%	10
Não Rígido	III	50 ± 10%	1
		500 ± 10%	10
	IV	50 ± 10%	1,5
		500 ± 10%	15
Escolher a menor velocidade que produz a ruptura entre $\frac{1}{2}$ e 5 minutos			

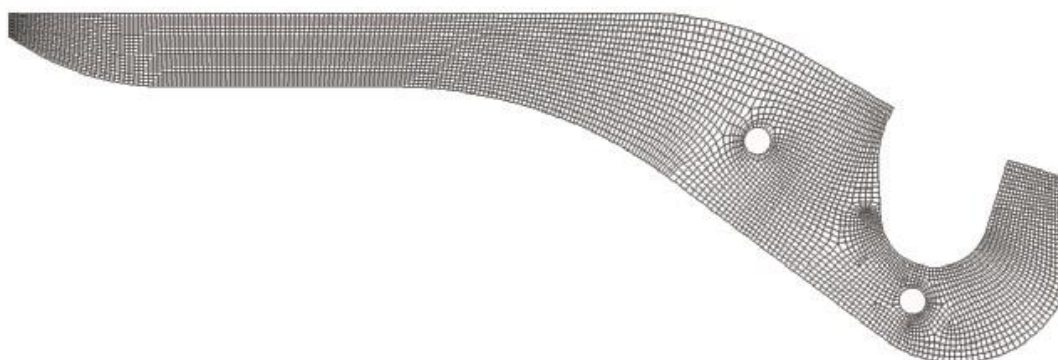
Fonte: Tradução adaptada da ASTM D638-10 (2014)

2.3 ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS

Segundo Chandrupatla e Belegundu (2015) o método dos elementos finitos é uma ferramenta muito significativa para resolução de problemas numéricos de uma grande variedade dentro da engenharia. Partindo da análise de tensão e deformação em automóveis, aeronaves ou até a análise de transferência de calor e outros problemas relacionados a fluídos ou fluxos magnéticos.

Em Norton (2013) é relatado que apesar de o método de análise de elementos finitos ser um dos métodos favoritos de resolução de problemas de engenharia, é importante a formulação correta e uso de malhas adequadas pois caso contrário os resultados podem ser incorretos, e o reconhecimento desses erros é extremamente importante para que o projeto seja um sucesso.

Figura 11 - Exemplo de objeto com malhas



Fonte: Norton (2015)

Com o auxílio de softwares CAE é possível extrair uma infinidade de informações referentes a simulação, em especial a Tensão equivalente de von Mises para engenharia mecânica com foco em análise estrutural é muito importante. Chandrupatla e Belegundu (2015) a define como um critério para determinar o início de uma falha em materiais dúcteis, através do estabelecimento de da tensão de von Mises (σ_{VM}).

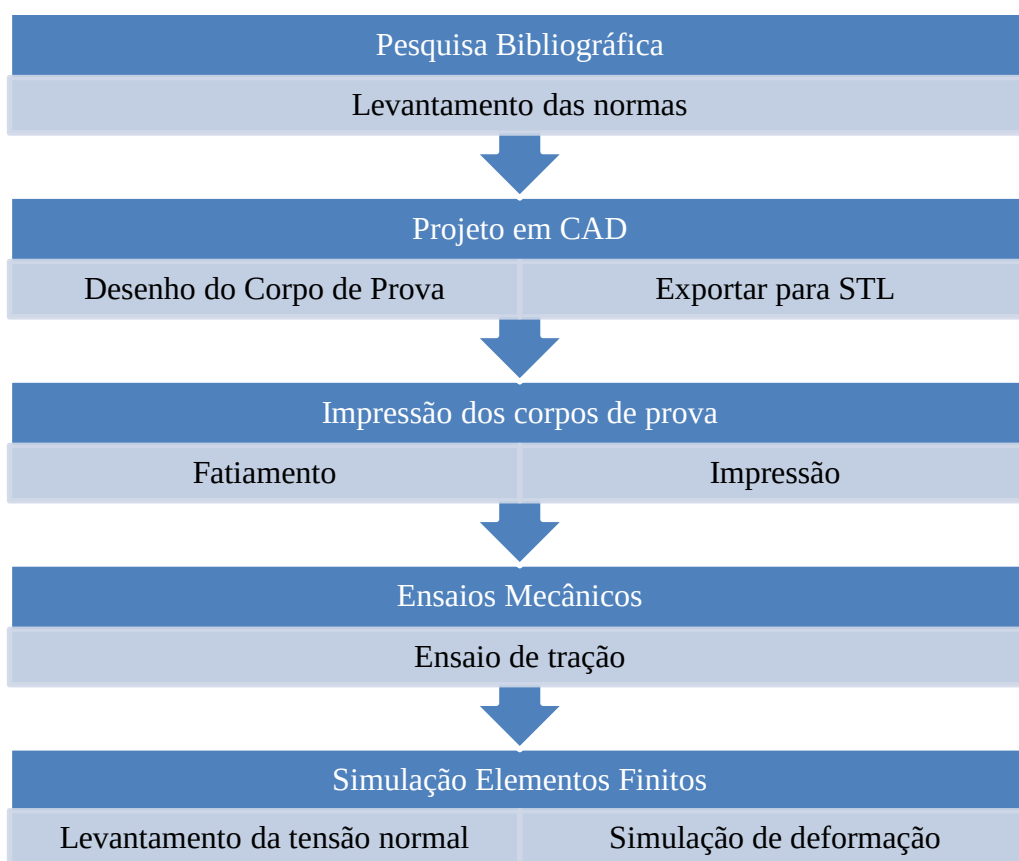
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será abordado detalhadamente o problema proposto, a metodologia utilizada e também os materiais necessários para que o projeto pudesse ocorrer.

3.1 DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES

Na Figura 13 há um esquema de como o trabalho foi desenvolvido, focando nos pontos principais para a execução do projeto.

Figura 12 - Fluxograma do Projeto



Fonte: Autor

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Para a realização do trabalho foram utilizados diversos instrumentos que serão descritos nos itens 3.2.1; 3.2.2; 3.2.3.

3.2.1 Impressora

Para a impressão dos corpos de prova foi utilizada a impressora da marca Creality, modelo Ender-3 V2.

Especificações Técnicas Relevantes:

- Diâmetro do Filamento: 1,75mm
- Movimentação: Cartesiana
- Volume de impressão: 220 x 220 x 250mm
- Materiais Compatíveis:
 - PLA – Material padrão conforme descrito no tópico 2.1.3
 - PETG - Material padrão conforme descrito no tópico 2.1.3
 - TPU – Termoplástico de Poliuretano utilizado em capas de celulares e sola de tênis.
 - PLA Flex – PLA com características mais flexíveis
 - PLA Silk – PLA com coloração metálica
 - PLA Wood – PLA com coloração similar a madeira
- Diâmetro do bico: 0,4mm
- Precisão de Impressão: $\pm 0,1$ mm
- Velocidade máxima de movimento: 180mm/s
- Velocidade máxima de impressão: 100mm/s
- Temperatura máxima do bico: 255°C
- Temperatura máxima da mesa: 110°C

3.2.2 Insumo Utilizado

Para impressão foi utilizado o material PLA, do fabricante National 3D cujas propriedades são ρ (volume específico) – 1,24 g/cm³ e Diâmetro – 1,75 ± 0,05mm.

3.2.3 Máquina Para Ensaio De Tração

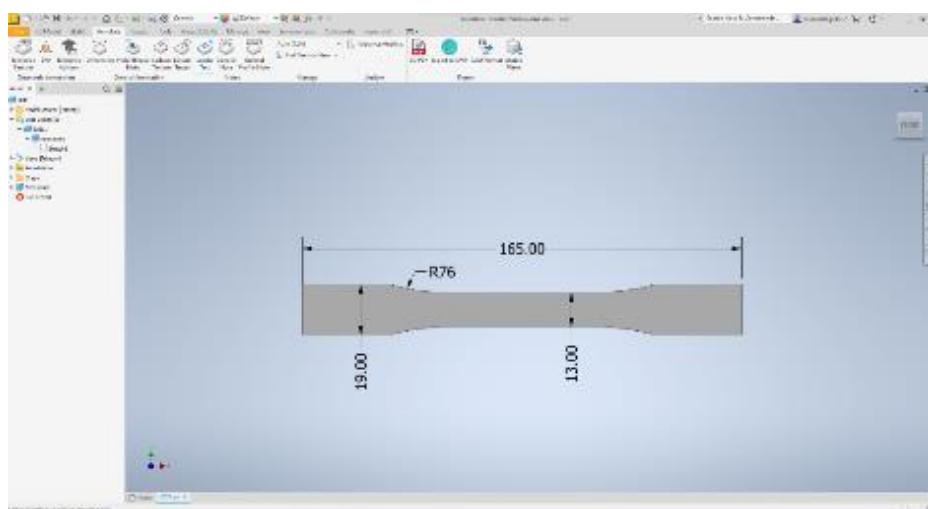
Para a realização dos ensaios de tração foi utilizada a máquina Modelo AGX-50KN da marca Shimadzu.

3.3 METODOLOGIA

3.3.1 Projeto Em CAD

Após definidas as dimensões e formato do corpo de prova, o projeto em CAD teve início, para tal foi utilizado o software Inventor. Conforme demonstrado pela Figura 13, onde está ilustrado a área de trabalho e dimensões principais.

Figura 13 - Área de Trabalho Inventor



Fonte: Autor

Após o desenvolvimento do Modelo CAD em formato IPT (Inventor Part), o arquivo foi exportado para o modelo padrão STL (Standard Triangle Language), que descreve o modelo 3D em uma série de triângulos conectados entre si, e é muito utilizado na prototipagem rápida pois quase todas as impressoras 3D atuais são compatíveis com o formato.

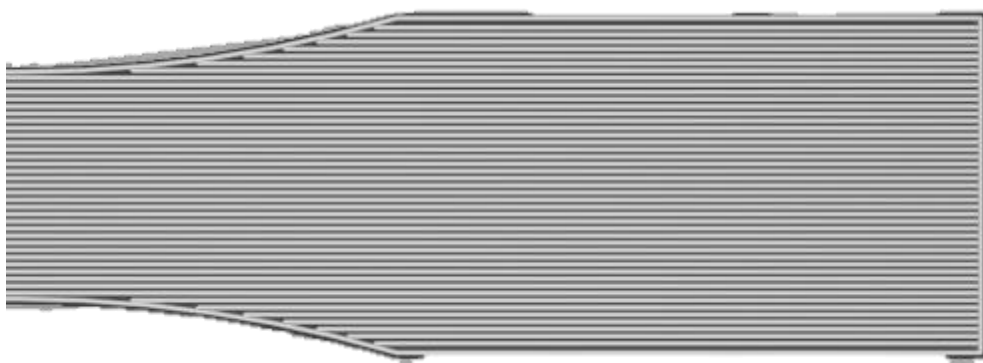
3.3.2 Impressão Dos Corpos De Prova

Em seguida o arquivo no formato STL foi inserido em um software fatiador, nesse caso o Ultimaker Cura na versão 5.2.0, que divide a geometria em diversas camadas, além de definir os sentidos de rasterização, entradas ou costuras envolvidas no processo, formato de preenchimento, entre outros.

Para a realização do experimento, os parâmetros de impressão que serão apresentados estão separados por orientação de deposição em relação ao comprimento da peça, a primeira condição apresentada possui orientação de 0° (Figura 14), a segunda condição apresenta uma angulação de deposição de 45° intercalada com camadas de -45° (Figura 15), enquanto a terceira amostra possui orientação de 90° (Figura 16) e a quarta amostra, há uma alteração do plano de impressão e orientação de deposição a 0° (Figura 17). O objetivo do projeto é entender a influência do sentido de deposição nas propriedades mecânicas, e para tal foi definido no escopo do projeto a utilização de 3 sentidos principais de preenchimento e um auxiliar.

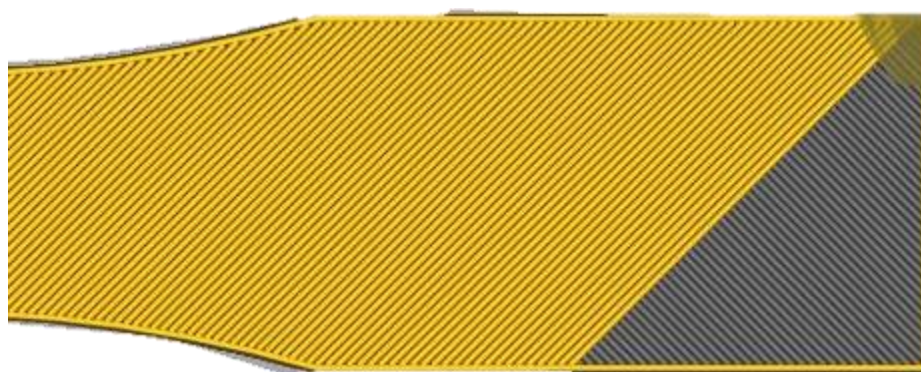
Os sentidos adotados para preenchimento foram impressos conforme as Figuras 14 a 18, no corpo de prova da Figura 15, é possível observar que as camadas se sobrepõem em orientações opostas, formando ângulos de 180° entre si.

Figura 14 – Corpo de Prova Condição 1 (0°)



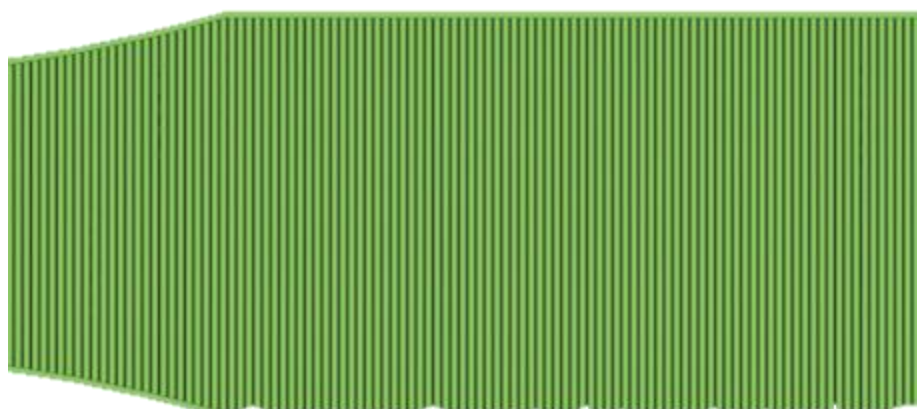
Fonte: Autor

Figura 15 – Corpo de Prova Condição 2 ($\pm 45^\circ$)



Fonte: Autor

Figura 16 – Corpo de Prova Condição 3 (0°)



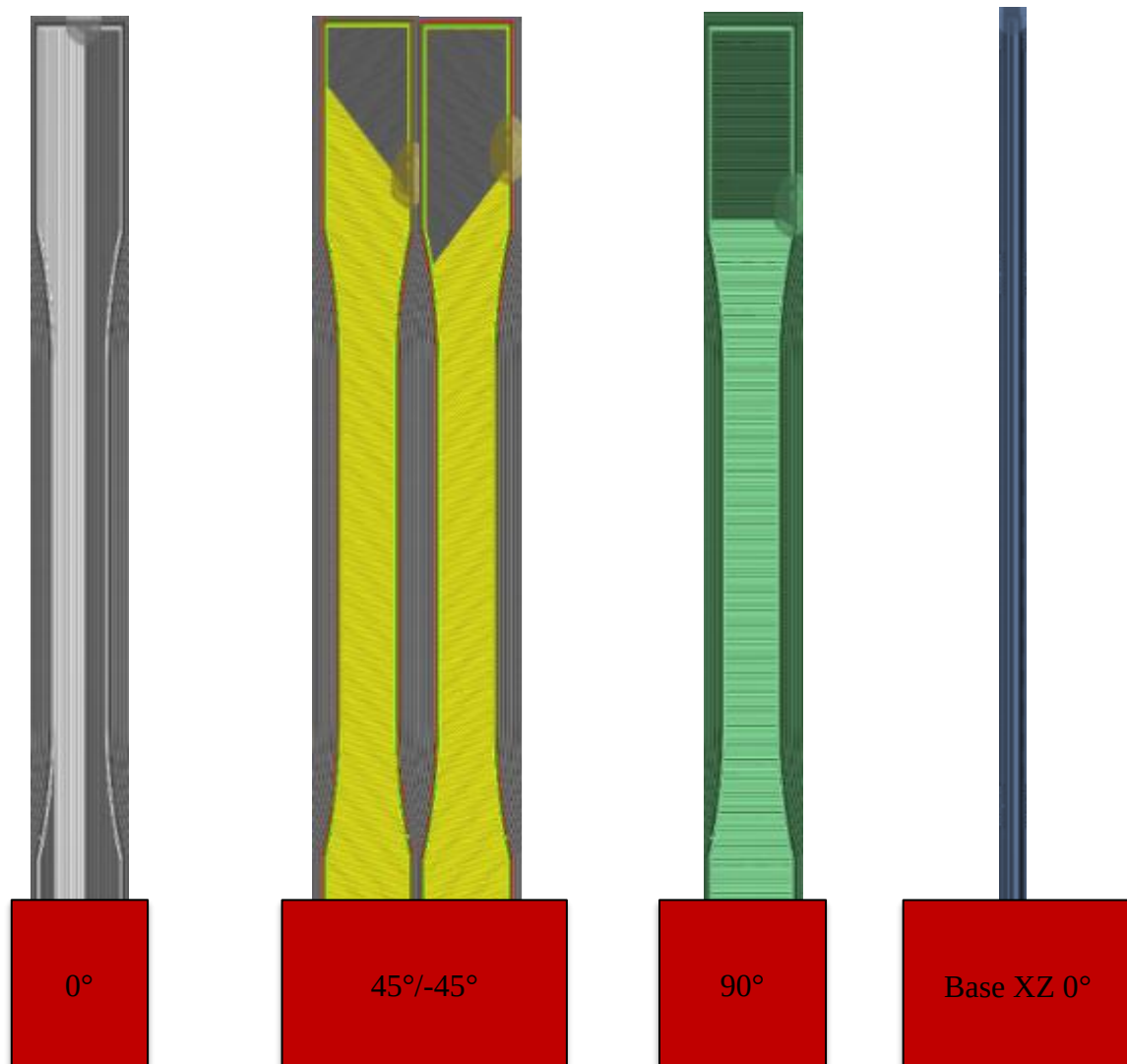
Fonte: Autor

Figura 17 – Corpo de Prova Condição 4 (Alteração de Base, 0°)



Fonte: Autor

Figura 18 - Sentidos de Deposição escolhidos Vista superior da mesa



Fonte: Autor

Para os casos um a três, a base da impressão foi ao longo do plano XY (face), enquanto no quarto caso foi utilizado como base de impressão o plano XZ. Foram impressos um total de 6 corpos de prova em cada uma das orientações, com exceção do caso 1 (Figura 14), pois foram impressos apenas 5 corpos de prova nesse caso.

Para garantir a reprodutibilidade, as Figuras 19 a 21 apresentam cada uma das configurações inseridas no fatiador (Ultimaker Cura).

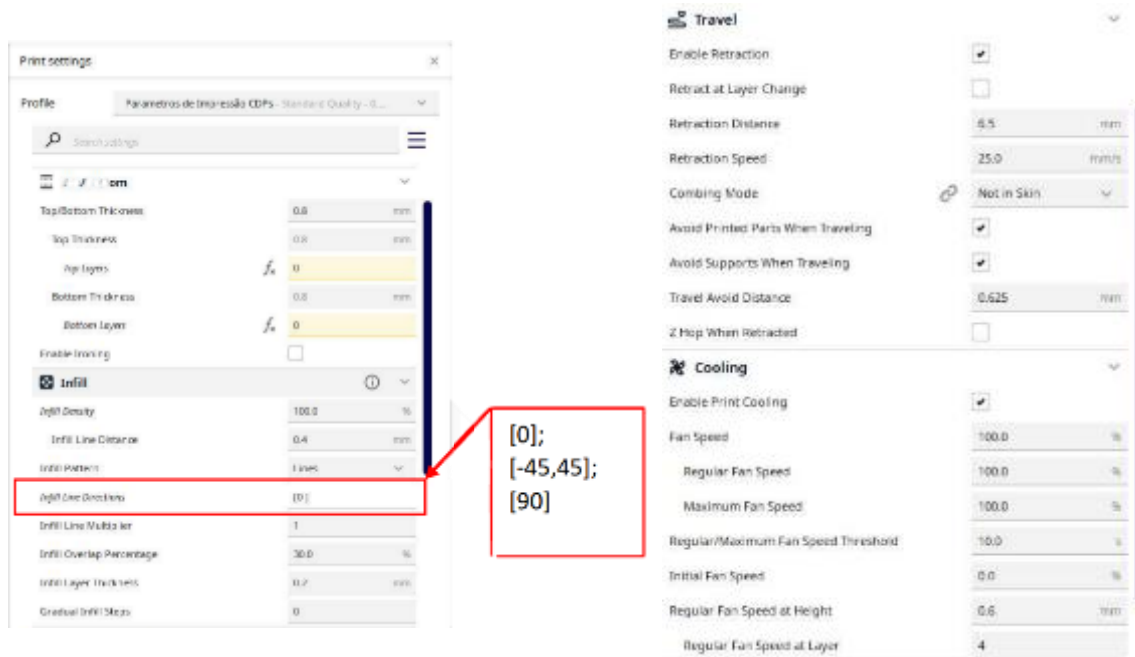
Figura 19 – Parâmetros de Qualidade, Parede, Material e Velocidade

The image shows the 'Print settings' window in Ultimaker Cura. The 'Profile' is set to 'Parâmetros de Impressão CDPs - Standard Quality - 0...'. The settings are organized into four main sections: Quality, Walls, Material, and Speed.

Section	Parameter	Value	Unit
Quality	Layer Height	0.2	mm
	Initial Layer Height	0.2	mm
	Line Width	0.4	mm
	Wall Line Width	0.4	mm
	Outer Wall Line Width	0.4	mm
	Inner Wall(s) Line Width	0.4	mm
	Infill Line Width	0.4	mm
	Initial Layer Line Width	100.0	%
Walls	Wall Thickness	0.8	mm
	Wall Line Count	2	
	Optimize Wall Printing Order	☒	
	Horizontal Expansion	0.0	mm
Material	Printing Temperature	192.0	°C
	Printing Temperature Initial Layer	192.0	°C
	Initial Printing Temperature	192.0	°C
	Final Printing Temperature	192.0	°C
	Build Plate Temperature	60	°C
	Build Plate Temperature Initial Layer	60	°C
Speed	Print Speed	45.0	mm/s
	Infill Speed	45.0	mm/s
	Wall Speed	45.0	mm/s
	Outer Wall Speed	45.0	mm/s
	Inner Wall Speed	45.0	mm/s
	Support Speed	45.0	mm/s
	Travel Speed	150.0	mm/s
	Initial Layer Speed	30.0	mm/s
	Skin/Brim Speed	30.0	mm/s
	Enable Acceleration Control	☐	
	Enable Jerk Control	☐	

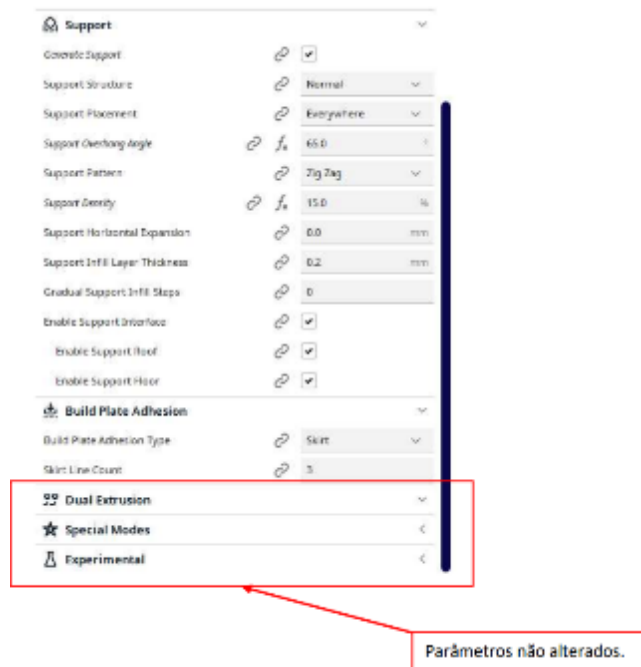
Fonte: Autor

Figura 20 – Parâmetros de Preenchimento, Trajeto e Refrigeração



Fonte: Autor

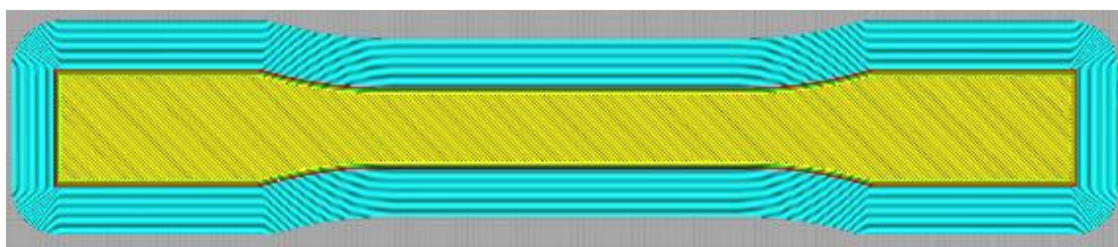
Figura 21 – Parâmetros de Suporte e Adesão



Fonte: Autor

A configuração de adesão Skirt gera linhas complementares na mesa para aumentar a adesão. Conforme demonstrado na Figura 22.

Figura 22 - Em azul aderência Skirt.



Fonte: Autor

3.3.3 Simulação De Elementos Finitos

Após a impressão dos corpos de prova foi iniciada a simulação do comportamento sob ensaio mecânico utilizando as propriedades mecânicas do PLA que estão demonstradas na Figura 23 e foram definidas utilizando os valores obtidos nos ensaios mecânicos. A simulação numérica computacional foi feita utilizando o pacote de análise estática estrutural.

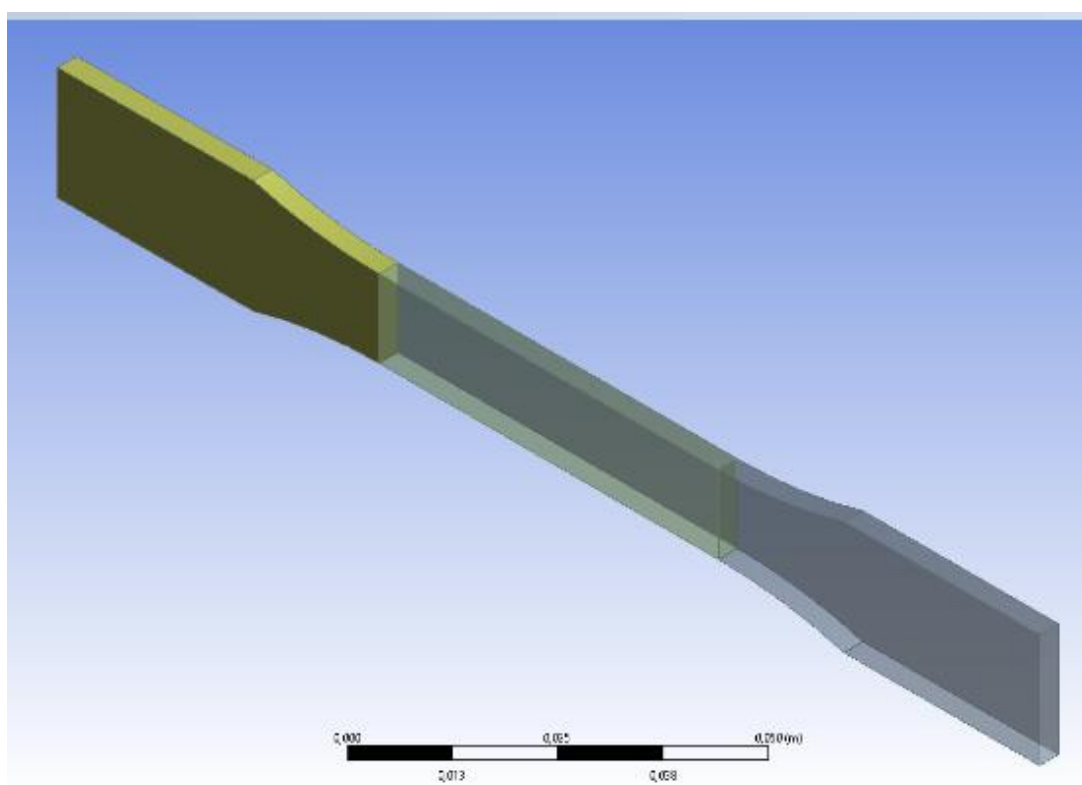
Figura 23 - Especificações Técnicas inseridas no Ansys para o PLA

Property	Value	Unit
 Material Field Variables	 Table	
 Density	1240	kg m ⁻³
 Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio	
Young's Modulus	1195	MPa
Poisson's Ratio	0,35	
Bulk Modulus	1,3278E+09	Pa
Shear Modulus	4,4259E+08	Pa
 Tensile Yield Strength	40	MPa
 Tensile Ultimate Strength	52	MPa

Fonte: Autor

As etapas realizadas para a simulação estão ilustradas nas Figuras 24 a 26. Primeiramente o corpo de prova foi dividido em 3 sólidos diferente após a importação da geometria do Inventor, conforme demonstrado na Figura 24. Isso foi feito para que as garras pudessem ser simuladas como segurando as extremidades.

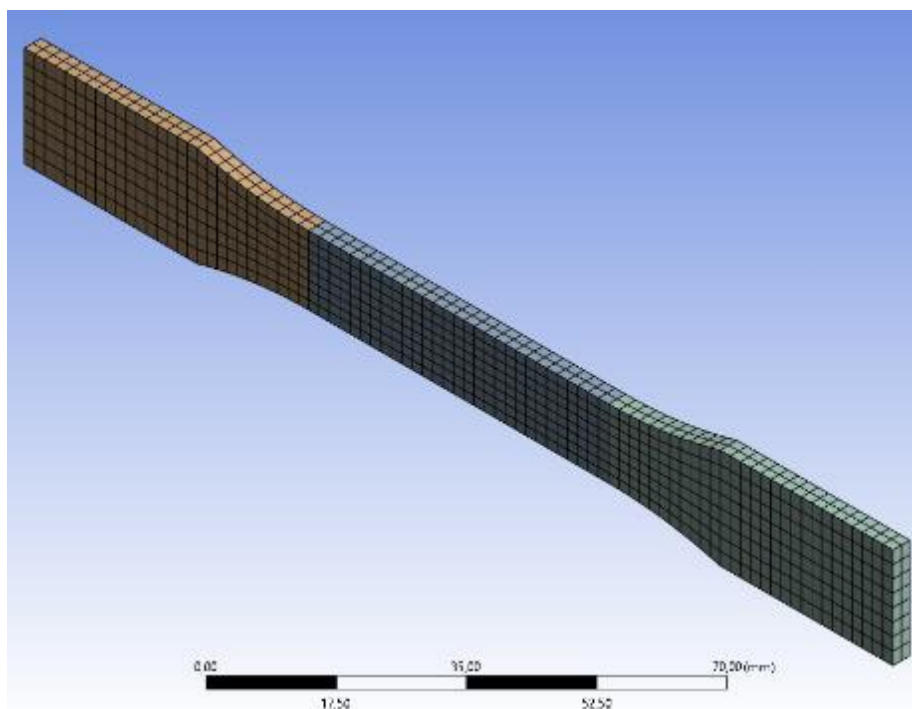
Figura 24 – Separação do corpo de prova em 3 sólidos



Fonte: Autor

Após a divisão, a geometria foi segmentada em uma malha conforme ilustrado na Figura 25, cujas configurações são as de um modelo físico mecânico, elementos de ordem quadrática, com um tamanho de 2mm para cada elemento, outras características foram mantidas conforme os padrões.

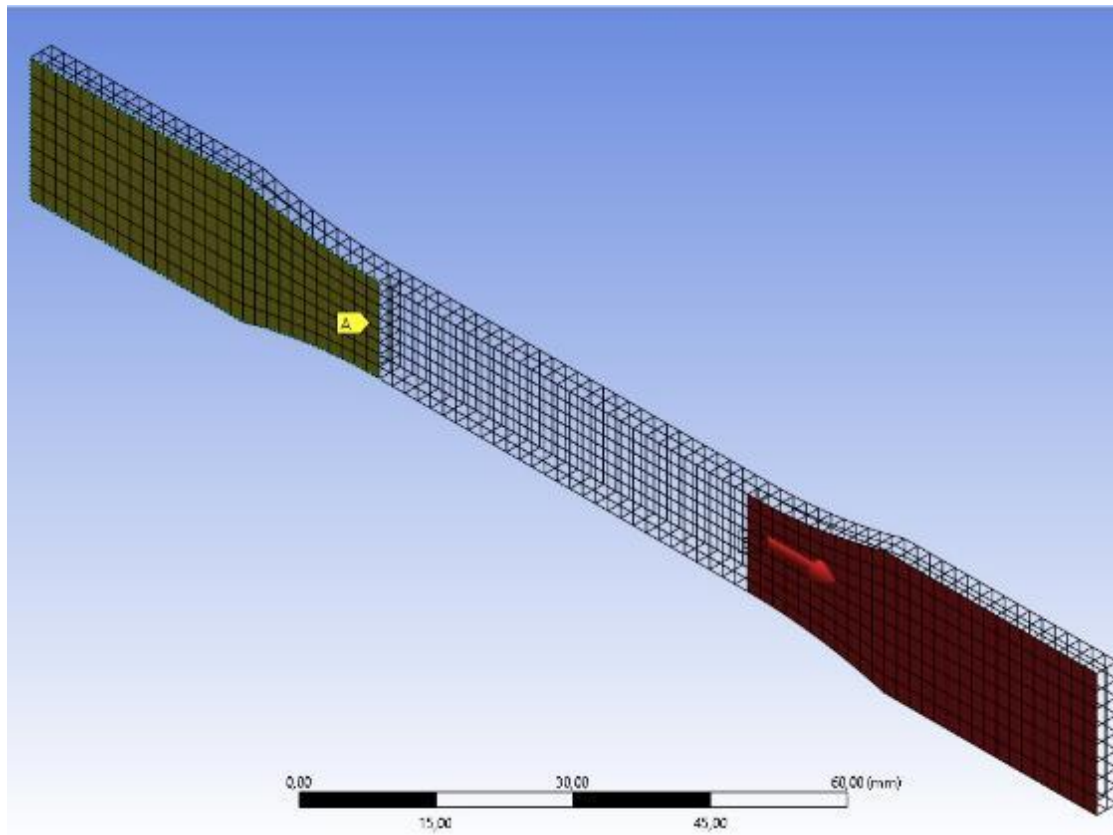
Figura 25 – Malha produzida no Ansys



Fonte: Autor

Para obtenção dos resultados foi utilizado uma restrição de movimento, e, uma das extremidades, com a ferramenta deslocamento remoto e uma carga remota na outra, de módulo 2.157,4 N (valor médio encontrado nos ensaios) no eixo X, conforme demonstrado na Figura 26. A razão para utilizar deslocamento remoto ao invés de suporte fixo é para que a deformação não ocorra na extremidade, e sim no comprimento em que se deseja fazer a análise. Já a carga, foi considerada remota para que agisse em toda a face da extremidade, porém estivesse aplicada no centro da peça.

Figura 26 – Elementos estáticos utilizados no Ansys

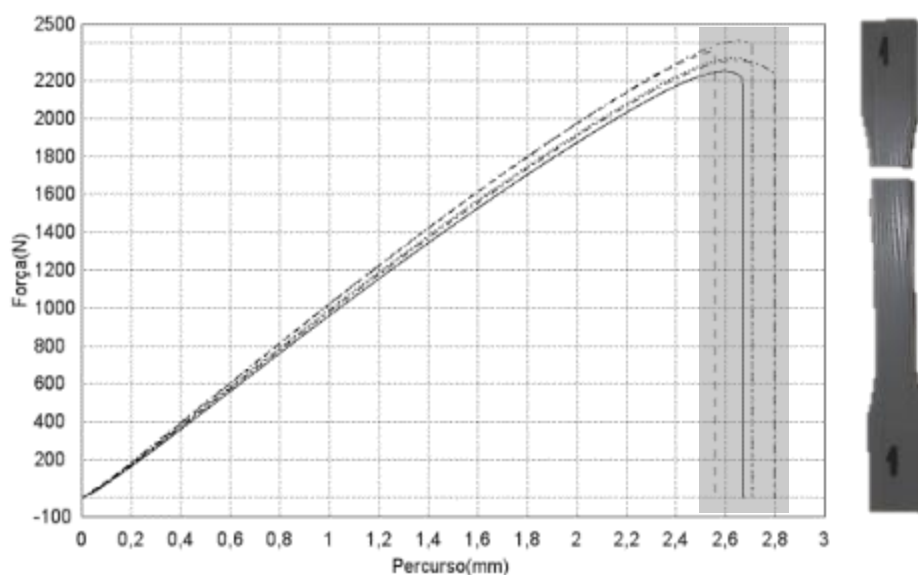


Fonte: Autor

4 RESULTADOS

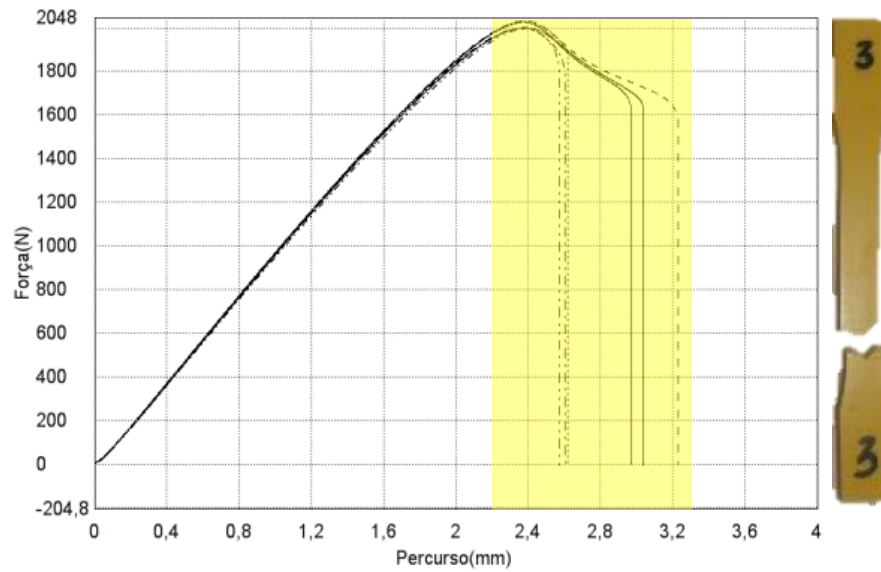
Após os ensaios de tração, a fratura nos corpos de prova ocorreu nos locais previstos e seu comportamento é frágil, assim como indicado pelas literaturas consultadas, além disso, as características de cada um dos tipos de impressão foram convergentes para todos os casos, conforme demonstrado nas Figuras 27 a 30 que representam os resultados de ensaio de tração para cada um dos CDPs (Corpo de Prova).

Figura 27 – Resultados do ensaio de tração para os CDPs na condição 1 (0°)



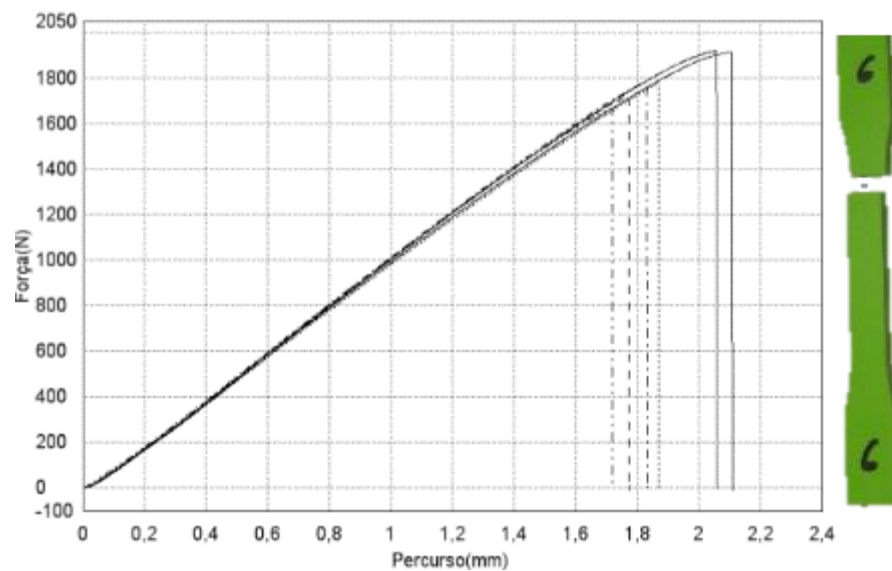
Fonte: Laboratório de Ensaio de Tração

Figura 28 – Resultado ensaio de tração dos CDPs na condição 2 ($\pm 45^\circ$)

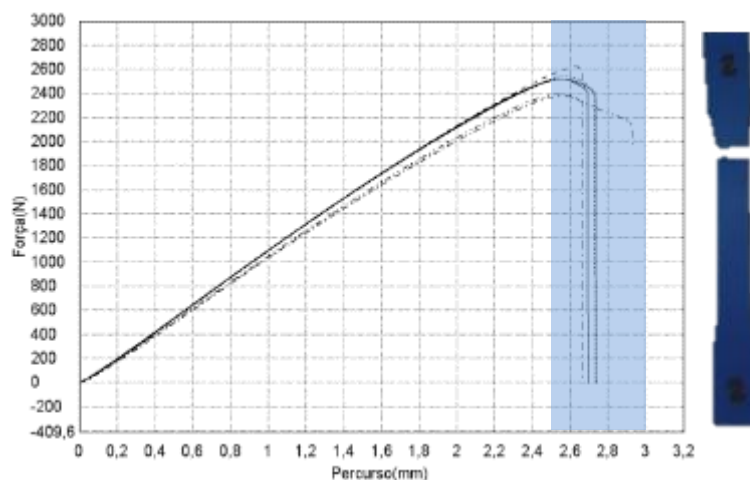


Fonte: Laboratório de Ensaio de Tração

Figura 29 – Resultados do ensaio de tração para os CDPs na condição 3 (90°)



Fonte: Autor

Figura 30 – Resultados dos ensaios de tração para os CDPs na condição 4 (0°)

Fonte: Laboratório de Ensaio de Tração

Nos gráficos apresentados nas Figuras 27, 28 e 30 foram identificadas as regiões plásticas de deformação, porém elas são aproximadamente inexistentes, o que demonstra o esperado de que o material possui comportamento frágil, na Condição 2 (Figura 28) a zona plástica aparenta ser maior, mas isso ocorre devido a suas camadas em direções intercaladas, que causam uma dificuldade maior para o rompimento do corpo de prova. Na condição 3 (Figura 29), a zona plástica é nula pois a deposição do material ocorreu perpendicular ao sentido de aplicação de carga, facilitando o desprendimento das camadas.

Os resultados obtidos nos ensaios de tração de tração se encontram na Tabela 3, após serem levantadas as curvas médias de força x deslocamento de cada um dos casos estudados.

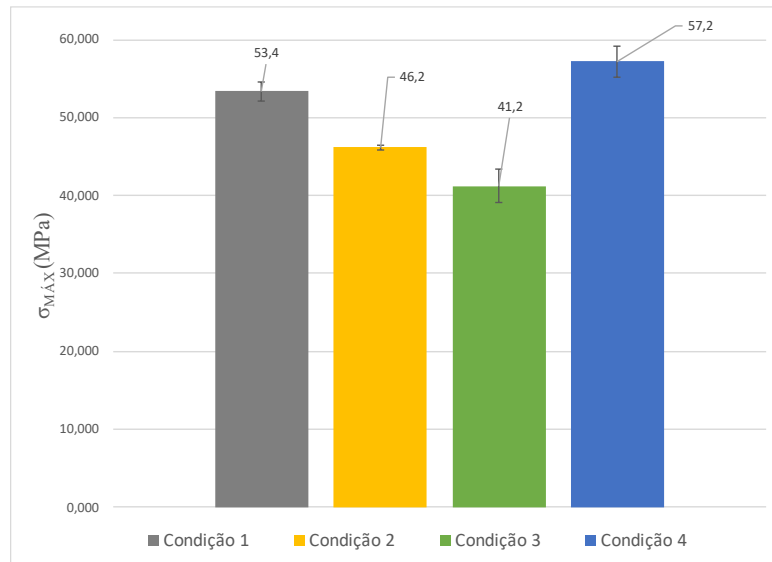
Tabela 3 - Resultados obtidos nos ensaios de tração

Propriedades	Condição 1 (Figura 27)	Condição 2 (Figura 28)	Condição 3 (Figura 29)	Condição 4 (Figura 30)
$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$53,36 \pm 1,219$	$46,17 \pm 0,33$	$41,19 \pm 2,17$	$57,2 \pm 1,95$
$\epsilon_{\text{máx}}$ (mm/mm)	$0,0458 \pm 0,001$	$0,0417 \pm 0,0001$	$0,0332 \pm 0,0025$	$0,0451 \pm 0,0006$
E (GPa)	$1,16 \pm 0,028$	$1,11 \pm 0,007$	$1,24 \pm 0,033$	$1,27 \pm 0,034$

Fonte: Autor

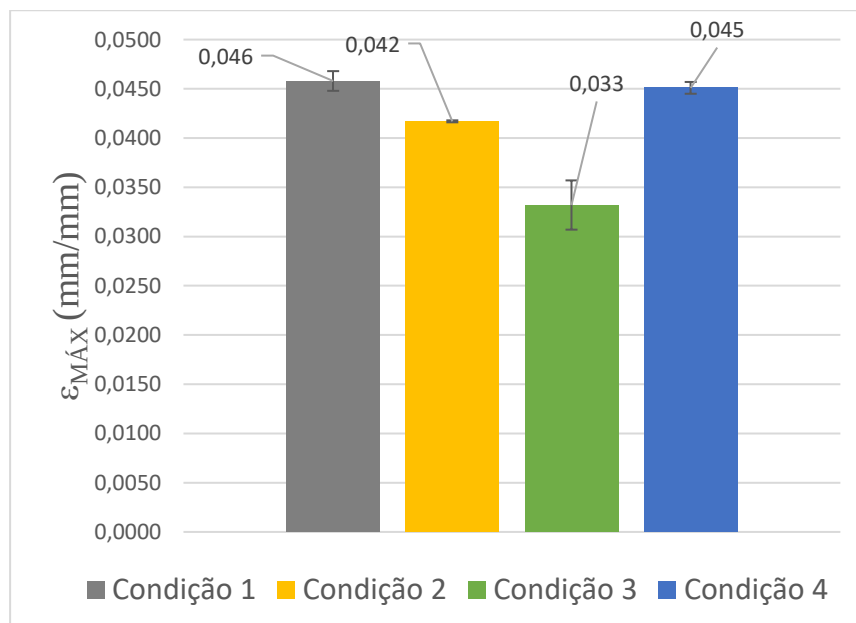
Para uma análise visual quanto ao comportamento do material, foram consolidados os dados de Tensão Máxima, Módulo de Elasticidade e deformação específica em forma de gráfico ilustrado pelas Figuras 31 a 33.

Figura 31 - Gráfico da Tensão máxima média encontrada para cada grupo

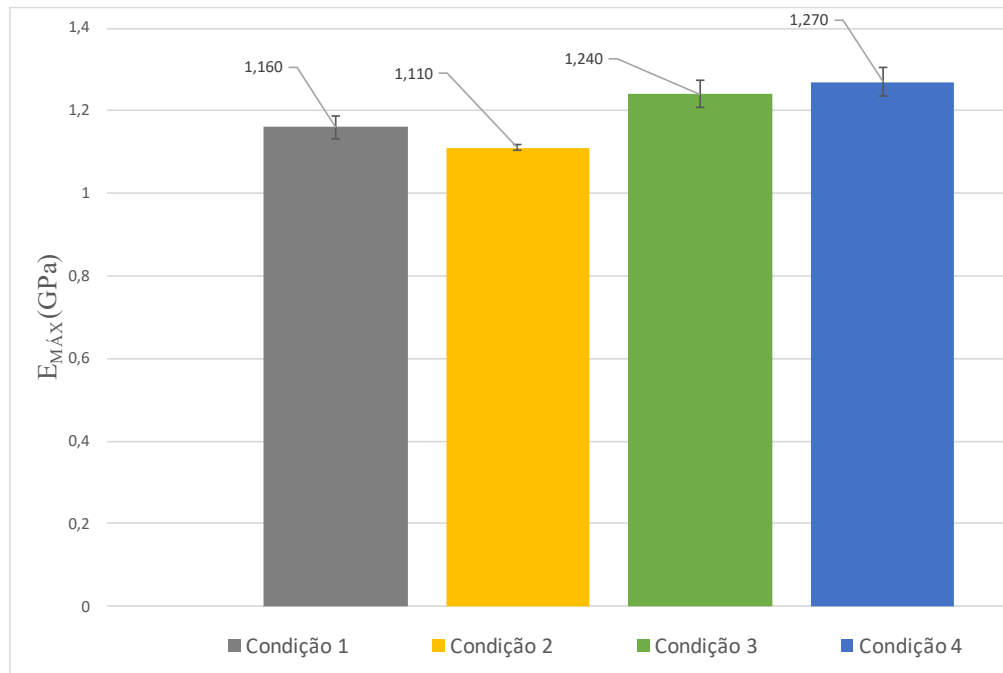


Fonte: Autor

Figura 32 – Gráfico da Deformação para a máxima Tensão de cada um dos grupos

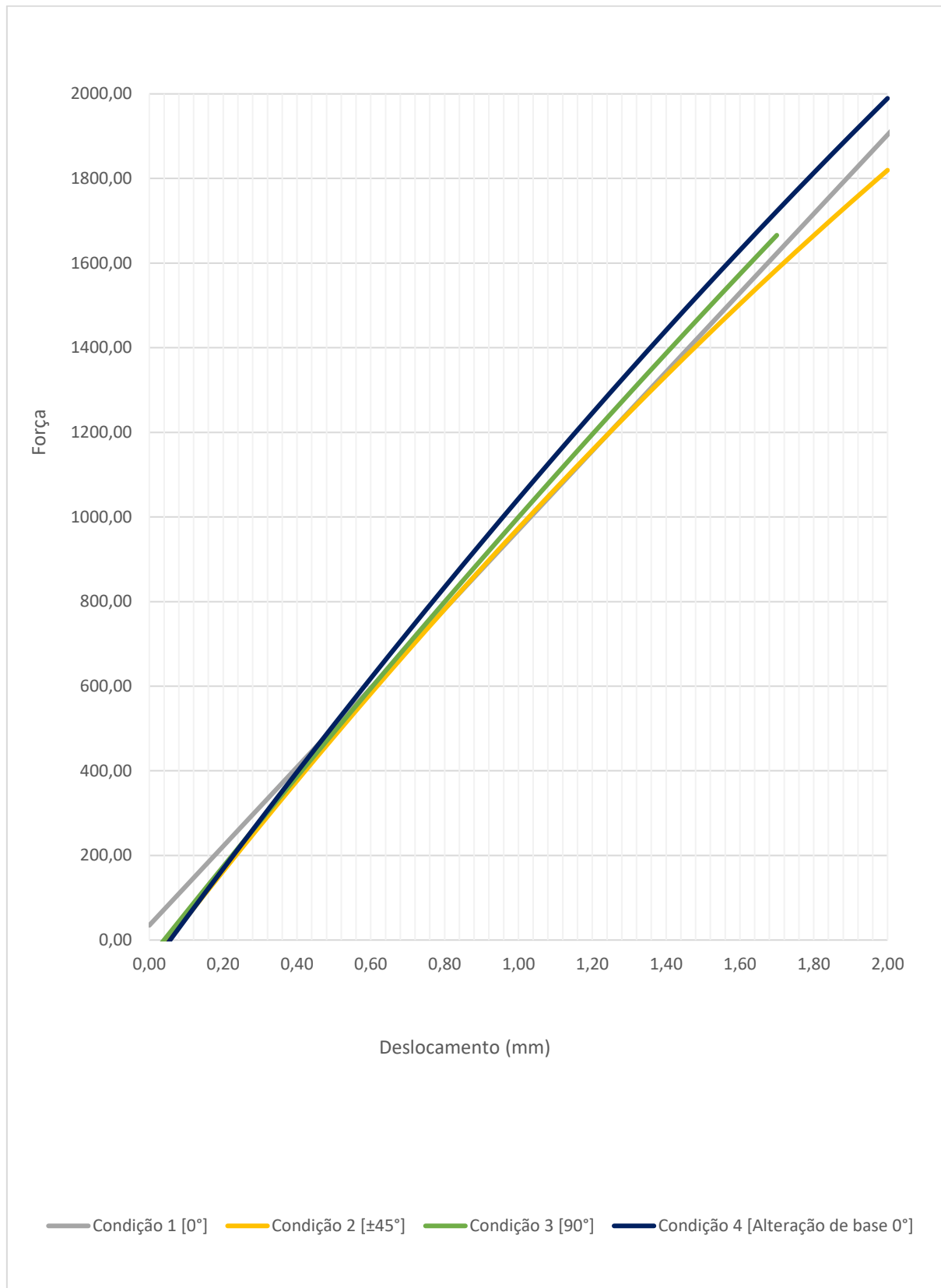


Fonte: Autor

Figura 33 - Gráfico consolidado do Módulo de Elasticidade

Fonte: Autor

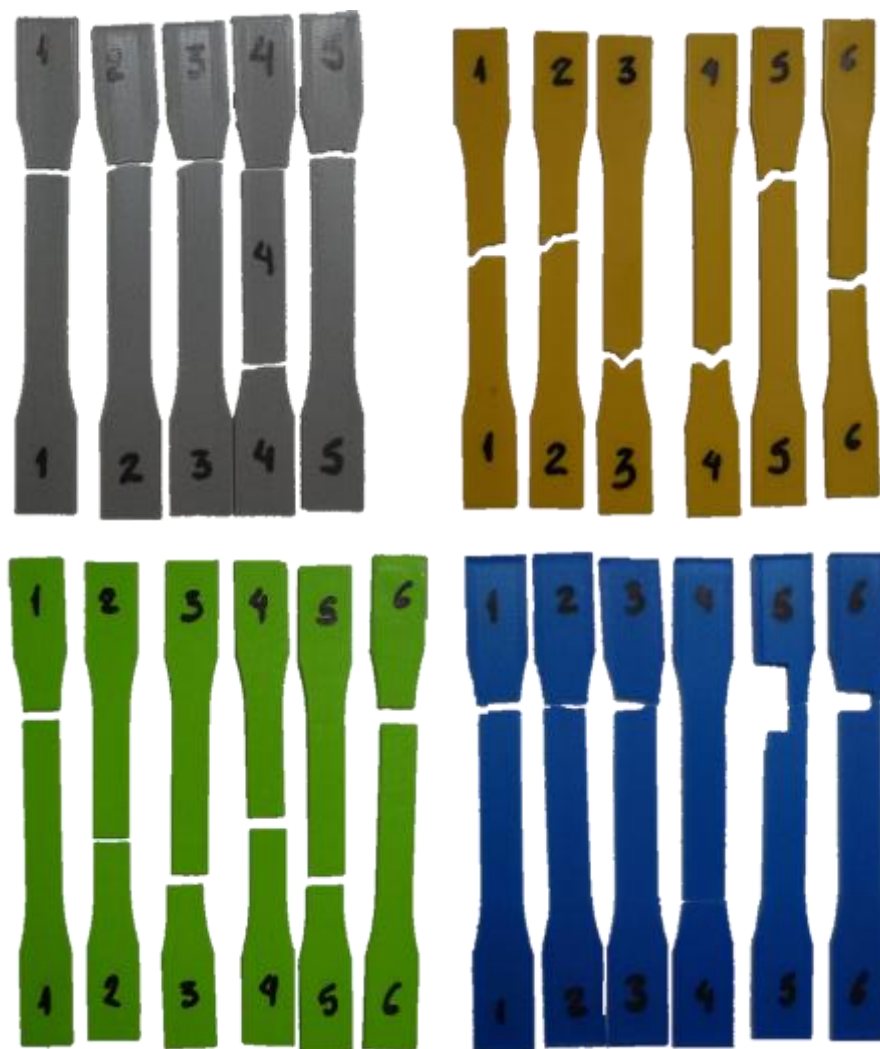
Duas características interessantes quanto a esse estudo são as demonstradas pelas Figuras 33 e 34, pois ambas apontam que o material PLA possui características próximas a isotrópicas (mesmo módulo de elasticidade em todos os sentidos de aplicação de carga), isso porque na Figura 33 é possível observar que independente da orientação da deposição, o módulo de elasticidade é similar, já na Figura 34, percebe-se que o comportamento da curva carga x deslocamento apresenta similaridades para os 4 casos estudados.

Figura 34 - Curva média consolidada de Força x Deslocamento

Fonte: Autor

Na Figura 35 está ilustrado o estado final de cada grupo de corpos de prova, algo que chama a atenção é que no ensaio de um dos corpos de prova na condição 1 a fratura ocorreu simultaneamente em ambos lados do CDP. Em todos casos com exceção da condição 2, é possível observar um comportamento frágil evidenciado pelo formato da fratura, que possui orientação perpendicular ao sentido de aplicação da carga.

Figura 35 – CDPs Após o ensaio

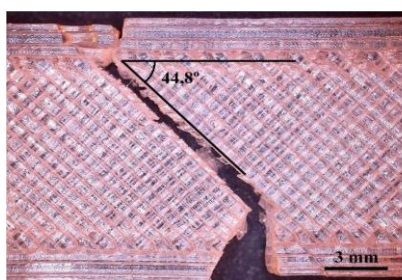


Fonte: Autor

Na literatura presente em Rodrigues (2018), encontram-se duas condições similares a utilizadas nesse projeto, são elas as condições 1 e 2 deste experimento, representadas respectivamente pelas Figuras 37 e 39, já as Figuras 36 e 38 são as encontradas na literatura, no primeiro caso, é possível observar uma angulação acentuada na região da fratura, formando um “Triângulo”, isso se deve as camadas intercaladas em cada uma das orientações ($\pm 45^\circ$), que geram uma dificuldade superior para o rompimento, já que antes de romper é necessário alinhar as camadas conflitantes.

Já nas Figuras 38 e 39 é possível observar um comportamento mais condizente com o de materiais frágeis, onde a orientação da fratura é perpendicular ao eixo de aplicação de carga.

Figura 36 - Fratura para $[+45/-45^\circ]$



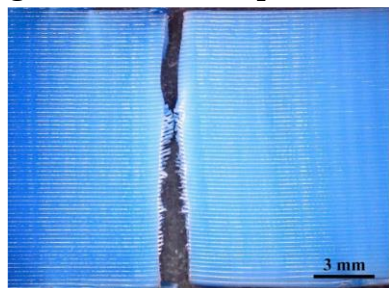
Fonte: Rodrigues (2018)

Figura 37 - Fratura para $[+45^\circ/-45^\circ]$



Fonte: Autor

Figura 38 - Fratura para $[0^\circ]$



Fonte: Rodrigues (2018)

Figura 39 - Fratura para $[0^\circ]$

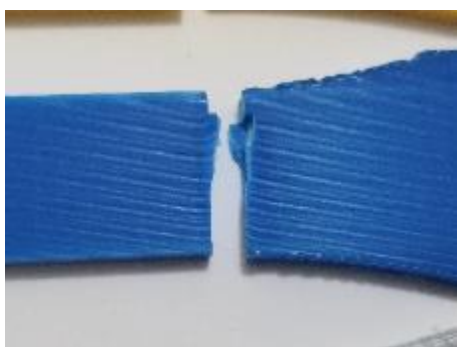


Fonte: Autor

Pelas imagens pode-se identificar modo de falha similar e condizente com a literatura. Para os modos de falha da Figura 40 não foram encontrados exemplos na literatura consultada, porém possuem comportamentos similares ao encontrado na Figura 39 e como

citado anteriormente, a região de escoamento é muito similar nos 4 casos, permitindo a consideração de suas propriedades como sendo isotrópicas.

Figura 40 – Fratura para [Base XZ 0°] à esquerda, [90° a direita]



Fonte: Autor



Fonte: Autor

Após a finalização dos ensaios de tração, foi possível identificar que as condições 1 e 4, respectivamente Figuras 37 e 40 possuem as melhores características de Tensão Máxima quando submetidas aos esforços axiais, pois a adesão entre as camadas ocorreu paralela ao sentido de aplicação da carga, assim como foi afirmado em Rodrigues (2018).

Ao adotar-se como padrão o valor da tensão máxima encontrada para a condição 1, obtém-se a Tabela 4, que representa uma comparação percentual entre as características calculadas para cada uma das situações.

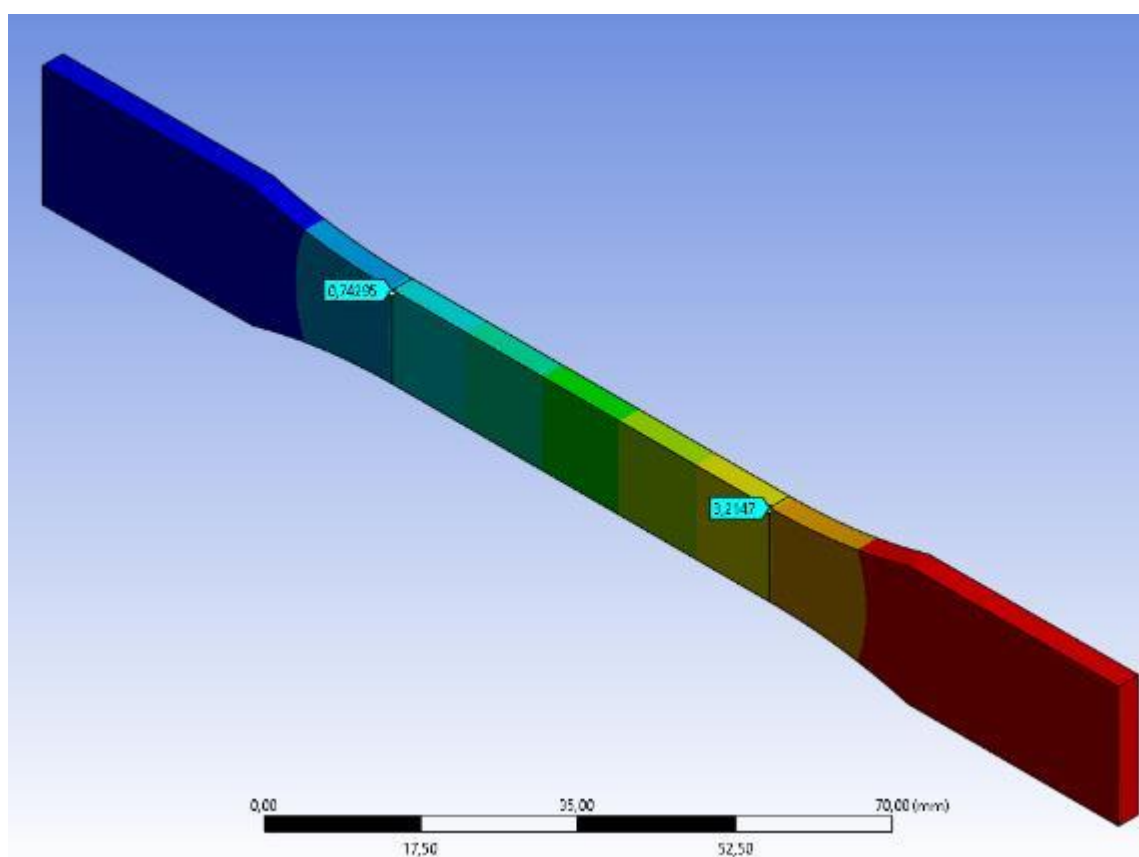
Tabela 4 - Comparação Percentual Tensão, Deformação e Módulo de Elasticidade

Propriedades	Condição 1 (Figura 27)	Condição 2 (Figura 28)	Condição 3 (Figura 29)	Condição 4 (Figura 30)
$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	53,360	46,17	41,190	57,200
%	100%	87%	77%	107%
$\epsilon_{\text{máx}}$ (mm/mm)	0,0458	0,0417	0,0332	0,0451
%	100%	91%	72%	98%
E (GPa)	1,16	1,11	1,24	1,27
%	100%	96%	107%	109%

Fonte: Autor

Quanto aos resultados da simulação de elementos finitos, é indicado na Figura 41 que o comportamento ilustrado é similar ao encontrado com os experimentos, atingindo um deslocamento longitudinal de 2,471 mm na região livre estipulada pela norma, também com valores próximos ao experimento realizado, que indicou um deslocamento médio de 2,363 mm, o que representa uma diferença de aproximadamente 3,75%.

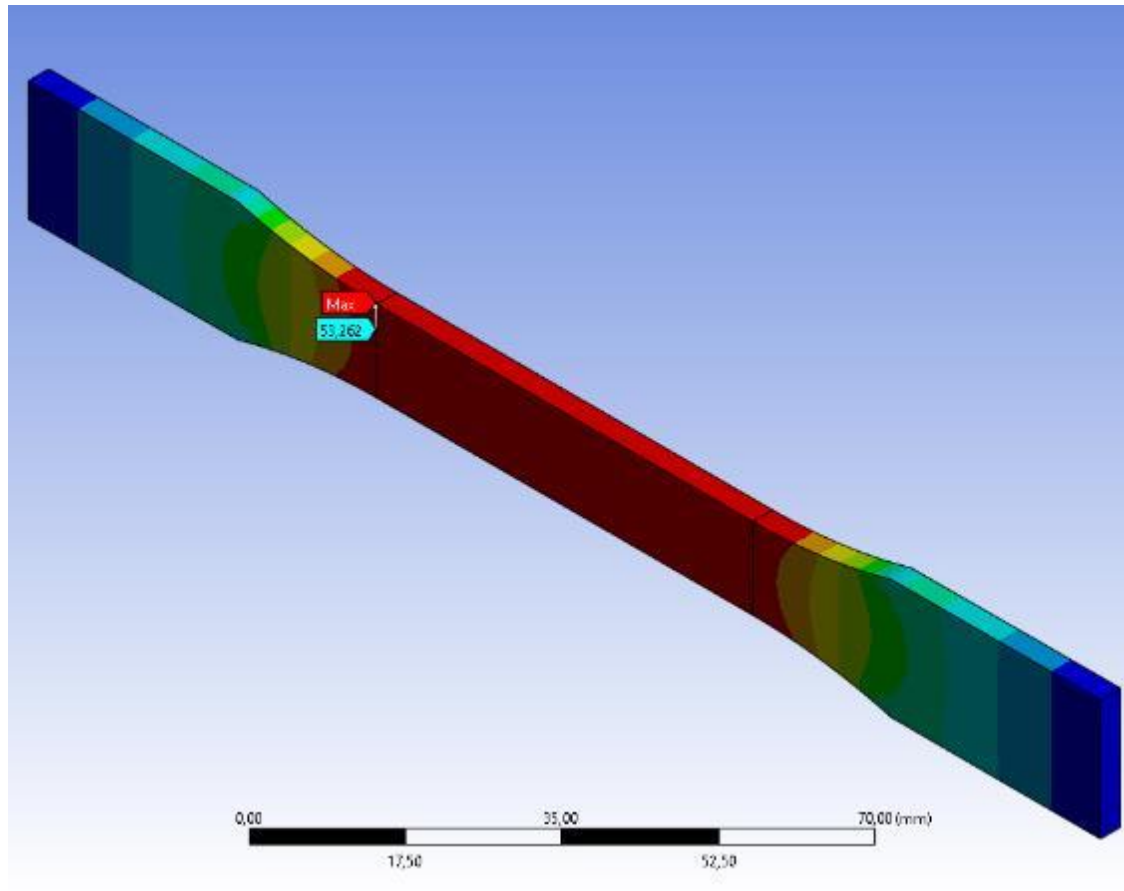
Figura 41 - Resultados da simulação para deslocamento



Fonte: Autor

Em relação a tensão normal encontrada pela simulação, a Figura 42 demonstra que a tensão normal máxima foi de 53,546 MPa e está de acordo com a tensão média calculada cujo valor é 49,48 MPa e representa uma diferença de 7,59% em relação ao resultado real.

Figura 42 - Resultado da simulação para Tensão Normal



Fonte: Autor

5 CONCLUSÃO

O entendimento da influência dos sentidos de deposição do PLA pode trazer diversos benefícios para eventuais utilizações, como por exemplo a identificação das melhores configurações durante o processo de impressão.

Após a realização dos ensaios, a caracterização do PLA permitiu estabelecer que suas características o tornam próximos a isotrópico, de comportamento frágil e também resistente quando comparado a outros polímeros utilizados na manufatura aditiva, além disso também foi possível estabelecer que para esforços axiais a deposição paralela a carga aplicada, representados pelas Figuras 14 e 17, é mais vantajosa e apresenta melhor desempenho, enquanto a deposição perpendicular ao sentido da carga, Figura 16, apresenta características menos desejadas devido ao efeito da adesão entre camadas que facilita a ruptura para este tipo de aplicação de carga.

A simulação utilizada apresentou resultados condizentes, levando em consideração que o PLA é um material com módulos de elasticidade dispersos ao longo da literatura e também deste experimento, as diferenças encontradas de 3,75% para deslocamento e 7,69% para tensão normal.

Uma sugestão para possíveis melhorias no estudo realizado é a simulação em diferentes materiais para entender o seu comportamento, além de analisar outros parâmetros de impressão quanto tempo de refrigeração, parede, método de adesão e também espessura de camada, além disso existem preenchimentos diferentes do 100% utilizado no experimento e alguns buscam permitir um comportamento isotrópico para os objetos impressos além de conferir mais leveza ao produto, um exemplo deste tipo de preenchimento é o HoneyComb (Favo de Mel) que preenche o sólido com hexágonos.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638-10**: Standard Test Method for Tensile Properties. West Conshohocken: ASTM International, 2014. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4336053/mod_resource/content/4/D638.1207962-1.pdf. Acesso em: 20 jan. 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM F2792 – 12A**: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. ASTM International, 2013. Disponível em: <https://web.mit.edu/2.810/www/files/readings/AdditiveManufacturingTerminology.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2023.

BAIÃO, F. J. **Funcionalidades e tecnologias da impressão 3D**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade São Francisco, Itatiba, 2012. Disponível em: <http://lyceumonline.usf.edu.br/salavirtual/documentos/2347.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2023.

CARDOSO, M. O. **Indústria 4.0**: a quarta revolução industrial. 2016. Monografia (Especialização em Automação Industrial) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Disponível em: https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/17086/1/CT_CEAUT_2015_08.pdf. Acesso em: 10 jan. 2023.

CHANDRUPATLA, T. R.; BELEGUNDU, A. D. **Elementos finitos**. 4. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil Ltda., 2015. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br/Leitor/Publicacao/10209/pdf/0?code=LFi1FJ1GSeWdIm9NBvUtMLrsx2Y0q95FvR2mQBNPtNDPi5a7q9Mtr2JQ7E2iZPpk1xLDP4ZyYrqop6WvmIc/yw==..> Acesso em: 15 jan. 2023.

CRUZEIRO, A.C. **Métodos de impressão 3D**: mecanismos e características. Mecanismos e características. 2019. Disponível em: <https://via.ufsc.br/metodos-de-impressao-3d/>. Acesso em: 27 jan. 2023.

GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. **Additive Manufacturing Technologies**: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. 2nd ed. New York: Springer, 2015. Disponível em: <https://docserver.ingentaconnect.com/deliver/connect/matthey/20565135/v59n3/s4.pdf?expires=1673811754&id=0000&titleid=99002804&checksum=84F28D68EFB1F3EFE133546BD7FFE109&host=https://www.ingentaconnect.com>. Acesso em: 15 jan. 2023

FORMLABS. **Guide to 3d printing materials**: Types, Applications, and Properties. Formlabs. 2017. Disponível em: <https://formlabs.com/blog/3d-printing-materials/>. Acesso em: 18 jan. 2023.

HIBBELER, R.C. **Resistência dos materiais**. 10. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil Ltda., 2018. 755 p. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br/Leitor/Publicacao/168498/pdf/0?code=39PeiOLOmbtSLGThZuCP13obtdFJGCF+K5RGUs7Z2OgnNG54ojo3E7DI/ecs5YOc4DCseYmCZumsr5LGGOK1kg==>. Acesso em: 20 dez. 2022.

KRISTIAWAN, R. B.; IMADUDDIN, F.; ARIAWAN, D.; ARIFIN, Z. A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: filament processing, materials, and printing parameters. **Open Engineering**, Warsaw, v. 11, n. 1, p. 639-649, 1 jan. 2021. Walter de Gruyter GmbH. <http://dx.doi.org/10.1515/eng-2021-0063>. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1515/eng-2021-0063>. Acesso em: 26 jan. 2023.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 1028 p.

PORTELA, S. **Conheça as propriedades técnicas dos materiais para impressora 3D**. 2017. Disponível em: <https://3dlab.com.br/tag/data-sheet-pla/>. Acesso em: 22 jan. 2023.

RODRIGUES, V. P.; ZANCUL, E. S.; MANÇANARES, C. G.; GIORDANO, C. M.; SALERNO, M. S.. Additive manufacturing: state-of-the-art and application framework. **Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas**, Bauru, v. 12, n. 4, p. 1-34, 1 jul. 2017. A Fundacao para o Desenvolvimento de Bauru (FunDeB). <http://dx.doi.org/10.15675/gepros.v12i3.1657>. Disponível em: <https://strathprints.strath.ac.uk/83336/>. Acesso em: 07 jan. 2023.

SELHORST, Aguilar Jr. **Análise comparativa entre os processos de prototipagem rápida na concepção de novos produtos: um estudo de caso para determinação de processo mais indicado**. 2008. 10 f. Monografia (Especialização em Engenharia de Produção e Sistemas) - Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2008. Disponível em: www.grima.ufsc.br/cobef4/files/121001084.pdf. Acesso em: 21 jan. 2023.

VOLPATO, N. **Manufatura aditiva: tecnologia e aplicações da impressão 3D**. São Paulo, SP: Blucher, 2017. 400p. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br/Leitor/Publicacao/158964/pdf/0?code=jd7N5RGdoPgT+JtkVDQtDMwzaTC8r8uKwVEh51M2yQ4CNxReyRzIJ+MA0usoY8905jhQsefoBEJI4JS520SiWg==>. Acesso em: 21 jan. 2023