

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
MINAS GERAIS - *CAMPUS* BETIM
ENGENHARIA MECÂNICA

Gustavo Fernandes Ramos

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DO NYLON 6 IMPRESSO E USINADO

Betim - MG

2024

GUSTAVO FERNANDES RAMOS

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DO NYLON 6 IMPRESSO E USINADO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - *Campus* Betim para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Me. Ismael Nogueira Rabelo de Melo

Betim - MG
2024

FICHA CATALOGRÁFICA

R175r Ramos, Gustavo Fernandes

Resistência à Tração do Nylon 6 Impresso e Usinado / Gustavo Fernandes Ramos. – 2024.

49 f.: il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2024.

Orientador: Prof. Me. Ismael Nogueira Rabelo de Melo

1. Impressão 3D. 2. Resistência à tração. 3. Usinagem. 4. Nylon.
5. Engenharia Mecânica. I. Ramos, Gustavo Fernandes. II. Título.


CDU: 620.17

Gustavo Fernandes Ramos


RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DO NYLON 6 IMPRESSO E USINADO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - *Campus* Betim para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.


Aprovado em: 25/09/2024 pela banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 ISMAEL NOGUEIRA RABELO DE MELO
Data: 23/10/2024 09:07:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Ismael Nogueira Rabelo de Melo - IFMG (Orientador)

Documento assinado digitalmente
 ROBERT LUIZ GOMES
Data: 24/10/2024 19:38:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Robert Luiz Gomes - IFMG

Documento assinado digitalmente
 GABRIEL MENDES DE ALMEIDA CARVALHO
Data: 24/10/2024 20:37:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Gabriel Mendes de Almeida Carvalho - IFMG

Dedico este trabalho ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais- Campus Betim, aos professores que me acompanharam nesta jornada, principalmente ao professor Ismael Nogueira Rabelo de Melo, sem o qual eu não teria concluído esta etapa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me permitido cursar esta graduação em uma instituição tão renomada e por ter me dado força e determinação para não desanimar durante a árdua caminhada.

Agradeço imensamente à minha amada esposa por toda a força, paciência e incentivo durante todos esses anos. Sem você, tudo seria mais difícil. Eu te amo!

Agradeço à minha mãe, que também sempre foi meu pai aqui na terra, por sempre me incentivar a buscar o conhecimento, por toda a força e ajuda que sempre me prestou, e, principalmente, por cuidar tão bem de mim e do meu irmão, sempre nos mostrando o caminho correto da vida. Este trabalho é a realização de um sonho nosso. Serei eternamente grato.

Agradeço ao meu irmão por todo o incentivo e força que me deu e por sempre ter estado ao meu lado, como um bom companheiro.

Agradeço grandemente ao meu orientador por toda a paciência, conhecimento transmitido e ajuda prática para a conclusão deste trabalho.

Agradeço também a todos os professores do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - Campus Betim por todo o conhecimento transmitido, sem o qual não seria possível a realização deste trabalho.

“A competitividade de um país não começa nas indústrias ou nos laboratórios de engenharia. Ela começa na sala de aula.”

Lee Lacocca

RESUMO

A impressão 3D, especialmente o processo FDM (*Fused Deposition Modeling*), tem se destacado na indústria por permitir a fabricação de peças com geometrias complexas, reduzindo o tempo e os custos de produção, onde baixo quantitativo de produção é requerido. O Nylon 6, um polímero com excelentes propriedades mecânicas, é amplamente utilizado na indústria em peças obtidas predominantemente pelo processo de usinagem. O presente trabalho avaliou a resistência à tração de corpos impressos variando-se o perfil e densidade de preenchimento, para análise da influência de cada um destes parâmetros na resistência à tração e embasar decisões sobre viabilidade da substituição de peças de nylon usinado por nylon impresso, reduzindo tempos e custos de setup para fabricação. Foram fabricadas amostras de nylon 6 por impressão 3D e usinagem. As amostras foram impressas com densidades de preenchimento de 10%, 40%, 70% e 100% e com perfis de preenchimento em linha, triangular e octeto com dimensões conforme norma ISO 527-2:2012. Observou-se que o perfil octeto demonstrou maior estabilidade estrutural nas amostras com densidades abaixo de 100%, apresentando menor número de acomodações estruturais. O aumento da densidade de preenchimento elevou a resistência à tração das amostras impressas, com o perfil triangular apresentando o maior valor dentre os três perfis analisados, atingindo uma resistência máxima de 26,36 MPa com densidade de preenchimento de 100%, em comparação aos 58,59 MPa obtidos na amostra usinada. Os resultados indicam que embora as peças impressas em 3D não alcancem a mesma resistência das usinadas, a impressão FDM pode ser uma alternativa viável para aplicações onde a resistência à tração exigida seja inferior a 50% da capacidade das peças usinadas, sendo especialmente útil para protótipos e pequenas séries de produção.

Palavras-chave: Impressão 3D. FDM. Nylon 6. Resistência à tração. Manufatura Aditiva. Densidade de preenchimento. Perfis de preenchimento.

ABSTRACT

3D printing, especially the FDM (Fused Deposition Modeling) process, has stood out in the industry for allowing the manufacture of parts with complex geometries, reducing production time and costs where low production quantities are required. Nylon 6, a polymer with excellent mechanical properties, is widely used in the industry in parts predominantly obtained by machining. This study evaluated the tensile strength of printed bodies by varying the infill pattern and density to analyze the influence of each of these parameters on tensile strength and to support decisions on the feasibility of replacing machined nylon parts with printed nylon, reducing setup times and manufacturing costs. Nylon 6 samples were manufactured by 3D printing and machining. The samples were printed with infill densities of 10%, 40%, 70%, and 100% with line, triangular, and octet infill patterns with dimensions according to ISO 527-2:2012. It was observed that the octet pattern demonstrated greater structural stability in samples with densities below 100%, presenting fewer structural accommodations. Increasing the infill density raised the tensile strength of the printed samples, reaching a tensile strength limit of 26.36 MPa in the triangular pattern with 100% infill density, compared to 58.59 MPa obtained in the machined sample. The results indicate that although 3D printed parts do not achieve the same strength as machined parts, FDM printing can be a viable alternative for applications where the required tensile strength is less than 50% of the capacity of machined parts, being especially useful for prototypes and small production runs.

Keywords: 3D Printing. FDM. Nylon 6. Tensile Strength. Additive Manufacturing. Infill Density. Infill Patterns.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema técnico da impressão 3D FDM.	14
Figura 2 – Exemplos de peças fabricadas com materiais isolantes elétricos.	15
Figura 3 – Esquema de arquivo STL.	18
Figura 4 – Etapas da impressão 3D.	18
Figura 5 – Principais razões da utilização da impressão 3D.	20
Figura 6 – Esquema de uma impressora 3D FDM.	21
Figura 7 – Esquema da deposição de camadas.	22
Figura 8 – Padrões de preenchimento do software Ultimaker Cura.	22
Figura 9 – Densidade de preenchimento.	23
Figura 10 – Limites de resistência à tração de amostras de nylon impresso.	25
Figura 11 – Curvas tensão x deformação de amostras de nylon usinado.	26
Figura 12 – Principais aplicações de cargas.	27
Figura 13 – Exemplos de corpo de prova para ensaio de tração.	28
Figura 14 – Representação esquemática de uma máquina de ensaio de tração.	29
Figura 15 – Comportamento tensão-deformação típico de um metal.	30
Figura 16 – Comportamento típico da curva tensão-deformação de engenharia até a fratura.	31
Figura 17 – Dimensões do corpo de prova padrão projetado no software SolidWorks.	32
Figura 18 – Exemplo de corpos de prova impressos em 3D.	33
Figura 19 – Filamento 1.75mm nylon 6 Dynalabs e barra quadrada Nylon 6 bruto para usinagem 40mm x 40mm x 200mm	33
Figura 20 – Parâmetros de impressão.	34
Figura 21 – Adaptação para ajudar na aderência à base da impressão.	35
Figura 22 – Impressora 3D Cr-10 do fabricante Creality.	36
Figura 23 – Fresadora ferramenta Eurostec FTV1.	36
Figura 24 – Amostras com densidade de preenchimento 10%.	38
Figura 25 – Amostras com densidade de preenchimento 40%.	39
Figura 26 – Amostras com densidade de preenchimento 70%.	40
Figura 27 – Amostras com densidade de preenchimento 100%.	41
Figura 28 – Resistência à tração em função das densidades de preenchimento.	42
Figura 29 – Resistência à tração da amostra usinada e média com densidades de preenchimento de 100% com perfil octeto.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades das Poliamidas	24
Tabela 2 – Propriedades mecânicas - Densidade de 10%.	37
Tabela 3 – Propriedades mecânicas - Densidade de 40%.	38
Tabela 4 – Propriedades mecânicas - Densidade de 70%.	39
Tabela 5 – Propriedades mecânicas - Densidade de 100%.	40
Tabela 6 – Propriedades mecânicas - Amostra usinada	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IFMG	Instituto Federal de Minas Gerais
FDM	Fused Deposition Modeling
STL	Standard Triangle Language
CAD	Computer Aided Design
V	Volts
mm	Milímetro
CAM	Computer Aided Manufacturing
PLA	Polylactic Acid
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
PETG	Polyethylene Terephthalate Glycol
PET	Polyethylene Terephthalate
PTT	Polytrimethylene Terephthalate
PS	Poliestireno
PC	Policarbonato
TPE	Thermoplastic Elastomer
TPN	Thermoplastic Nitrile
TPC	Thermoplastic Copolyester
PVA	Polivinil Álcool
FFF	Fused Filament Fabrication
SLA	Stereolithography
DLP	Digital Light Processing
SLS	Selective Laser Sintering
SLM	Selective Laser Melting
PA	Poliamida
RH	Humidade relativa

MPa	Mega Pascal
N	Newton
SI	Sistema internacional
Psi	Pounds per Square Inch
LRT	Limite de resistência a tração
°C	Graus Celsius
g	Gramas
CP	Corpo de prova

LISTA DE SÍMBOLOS

σ	Sigma
ε	Épsilon
%	Porcentagem

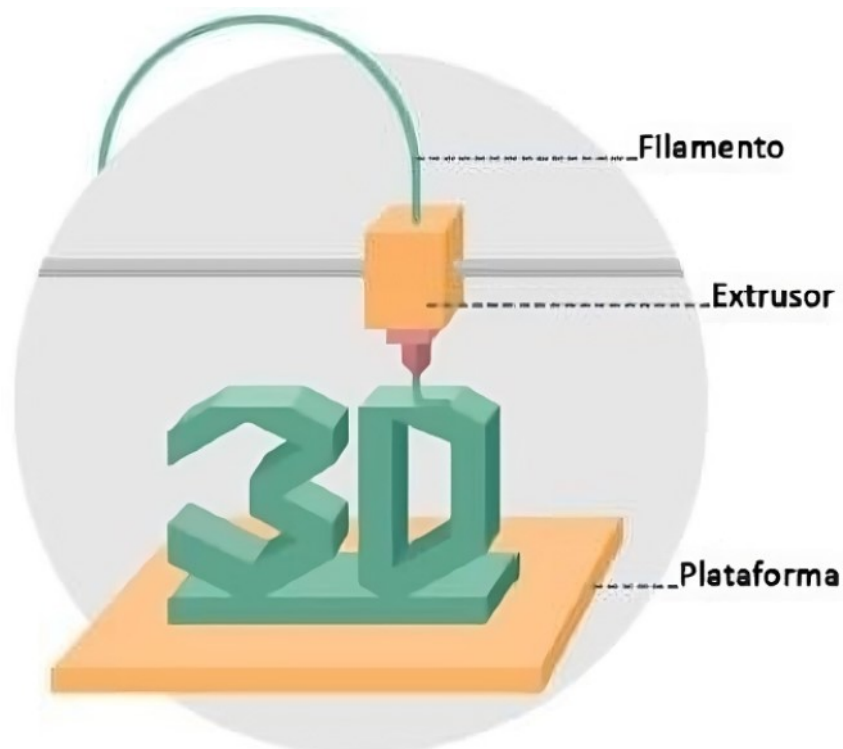
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	15
1.2	Objetivos	16
1.2.1	<i>Objetivo geral</i>	16
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	<i>Manufatura aditiva e suas variantes</i>	17
2.2	<i>Nylon e suas propriedades</i>	23
2.3	<i>A impressão FDM em substituição à Usinagem</i>	25
2.4	<i>Ensaio de tração</i>	26
3	METODOLOGIA	32
4	RESULTADOS	37
4.1	<i>Amostras de impressão 3D</i>	37
4.1.1	<i>Amostras com densidade de preenchimento 10%</i>	37
4.1.2	<i>Amostras com densidade de preenchimento de 40%</i>	38
4.1.3	<i>Amostras com densidade de preenchimento de 70%</i>	39
4.1.4	<i>Amostras com densidade de preenchimento de 100%</i>	40
4.2	<i>Influência da densidade de preenchimento e comparativo com amostras usinadas.</i>	41
5	CONCLUSÃO	44
6	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	45
	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

A impressão 3D FDM (*Fused Deposition Modeling*) é uma tecnologia que tem ganhado cada vez mais espaço na indústria e na sociedade como um todo. Trata-se de um processo de fabricação que permite produzir modelos físicos tridimensionais diretamente a partir de um modelo CAD (SILVA, 2022). No processo FDM, ocorre a deposição de um determinado material polímero termoplástico em pequenas quantidades por meio de um bico extrusor sobre uma plataforma de construção (Figura 1). Esse procedimento tem como objetivo criar a primeira camada do objeto e após a conclusão da primeira camada, passa-se então para a deposição da segunda, repetindo-se esse processo até que a peça esteja totalmente formada. Para permitir a solidificação do termoplástico, a plataforma de construção é mantida em uma temperatura mais baixa em relação à temperatura de extrusão (SILVA, 2022), porém cabe ressaltar que o aquecimento da mesa também tem a função de garantir a adesão do polímero na mesma.

Figura 1 – Esquema técnico da impressão 3D FDM.



Fonte: Silva (2022).

Dentre os materiais utilizados na tecnologia de impressão 3D está o Nylon ou “poliamida”, considerado um plástico de baixo custo, resistente, leve e flexível, e que é utilizado largamente na fabricação de peças industriais em processos convencionais subtrativos (PLASTIREAL IND E COM. DE PLÁSTICOS LTDA, 2023), devido a suas características elétricas e mecânicas. Dentre essas características, podemos mencionar a rigidez dielétrica, que está relacionada com o grau de isolamento que o material possui e é medida pela tensão elétrica máxima que o material é capaz de suportar antes de permitir a passagem de corrente através dele (LISBOA, 2022). O nylon tem

alta rigidez dielétrica ($\approx 28 \times 10.6 \text{ V/mm}$), por este motivo é muito utilizado na fabricação de peças isolantes a partir do processo de usinagem (PLASTIREAL IND E COM. DE PLÁSTICOS LTDA, 2023).

Motivado pelo amplo uso do nylon na produção de peças mecânicas, o presente trabalho visa examinar a resistência à tração de amostras usinadas e impressas, servindo de base para análises de viabilidade da aplicação de peças impressas em nylon em substituição às usinadas, quando baixos volumes de peças são requeridos na indústria.

1.1 Justificativa

Em muitas empresas, existem peças de baixa demanda, por isso seus custos se tornam altos devido a processos e setups, de modo que inviabilizam até mesmo a continuidade dessa produção ou processo. Um exemplo prático, são acessórios isolantes para ferramentas para manutenção de linhas elétricas que são fabricadas atualmente por modelamento de resina, madeira usinada ou nylon usinado (Figura 2), sendo estes processos bastante morosos. Além das características dielétricas, as peças fabricadas demandam por propriedades mecânicas específicas, como por exemplo a resistência à tração. A verificação desta propriedade em peças impressas poderá embasar decisões sobre a viabilidade da fabricação por FDM em substituição à usinagem por resultar em baixos tempos de setup e custos quando baixas quantidades são requeridas.

Figura 2 – Exemplos de peças fabricadas com materiais isolantes elétricos.

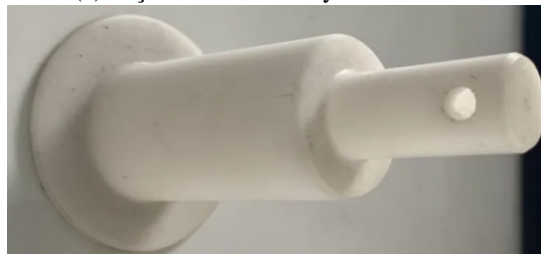
(a) Peças fabricadas em resina.



(b) Peça fabricada em madeira usinada.



(c) Peça fabricada em nylon 6 usinado.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivo geral*

Analisar a influência dos perfis e densidade de preenchimento na resistência à tração a fim de se observar qual a condição impressa mais se aproxima do corpo de prova usinado.

1.2.2 *Objetivos específicos*

1. Analisar a influência dos perfis de impressão na resistência a tração.
2. Analisar a influência da densidade de preenchimento na resistência a tração.
3. Obter dados para embasamento de análises de viabilidade da utilização do nylon impresso de forma substitutiva ao nylon usinado na fabricação de peças.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 *Manufatura aditiva e suas variantes*

A manufatura aditiva, profundamente vinculada à revolução digital, está emergindo como uma tecnologia de destaque em escala global por causa de sua habilidade transformadora em diversos setores, como medicina, indústria, moda, robótica, arquitetura e engenharia, devido as várias vantagens que apresenta, dentre elas destacam-se a liberdade criativa e a notável rapidez de execução sem necessidade de longos setups, viabilizando a fabricação de peças personalizadas ou séries limitadas de forma ágil e com custos competitivos visto os altos preços de ferramentais específicos (ABREU, 2015).

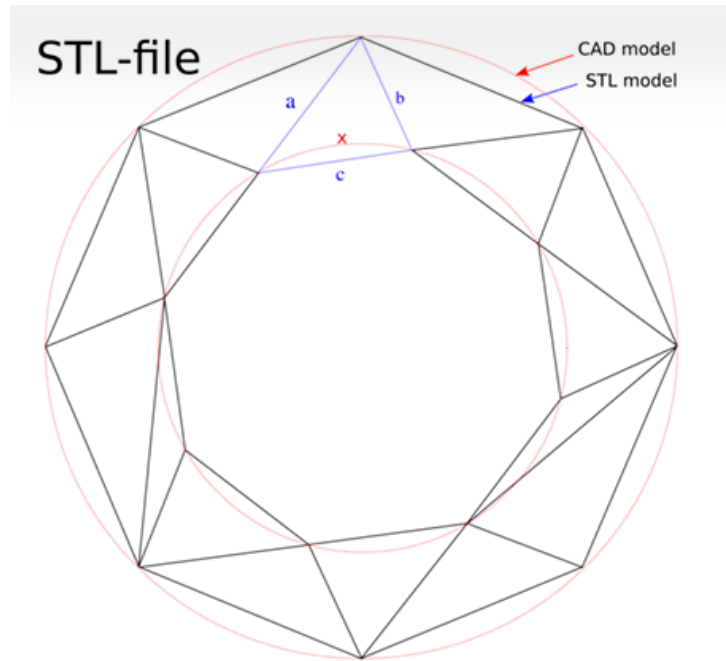
A impressão 3D é um processo de fabricação aditiva que permite criar objetos físicos a partir de um modelo digital que ao contrário dos métodos tradicionais de fabricação que envolvem a remoção de material (como corte ou usinagem), constrói o objeto camada por camada adicionando material conforme necessário. O modelo tridimensional é criado usando um software CAD (*Computer Aided Design*) desenvolvido para substituir o desenho manual, que era demorado e de difícil reaproveitamento (C.S.GÓES, 2013), como exemplo pode-se citar os softwares AutoCAD, SOLIDWORKS, CATIA e vários outros. Em seguida, o modelo é salvo como um arquivo STL (*Standard Tecelation Language*), que basicamente, consiste em transformar a superfície externa do objeto em uma série de triângulos, tornando-o adequado para impressão (Figura 3). Os triângulos são preferidos porque se assemelham a vetores, oferecendo intensidade, direção e sentido, características essenciais para impressão em 3D (3DLAB, a).

Após a obtenção do arquivo STL, um sistema CAM (Manufatura Assistida por Computador) é utilizado para simular as operações de impressão, criando estratégias que são posteriormente transformadas em código G. Esse código é a linguagem de programação que fornece as instruções necessárias para a máquina executar as ações planejadas (PLMX,).

Segundo Luz (2019), o processo de impressão 3D é constituído pelas etapas ilustradas na Figura 4 e consistem em:

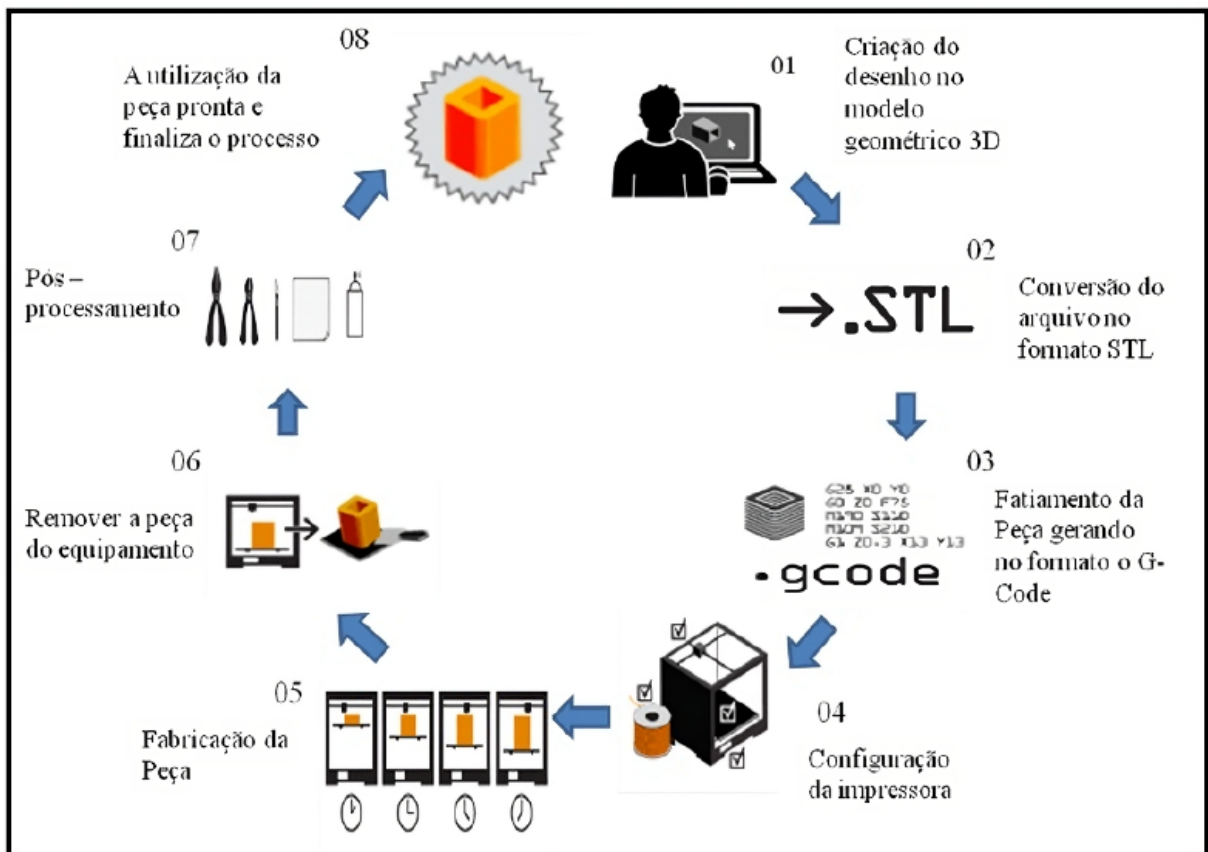
- **Modelagem 3D:** Um objeto é criado digitalmente usando software de modelagem. A modelagem geométrica é um procedimento detalhado que envolve várias operações complexas, como operações de Euler, projeções paralelas, representação de contorno, modelagem volumétrica, modelagem algorítmica, entre outros. Esse procedimento tem como objetivo principal criar representações tridimensionais de estruturas por meio da interação de diferentes formas geométricas (AGOSTON, 2005).

Figura 3 – Esquema de arquivo STL.



Fonte: 3DLab (a).

Figura 4 – Etapas da impressão 3D.



Fonte: Luz (2019).

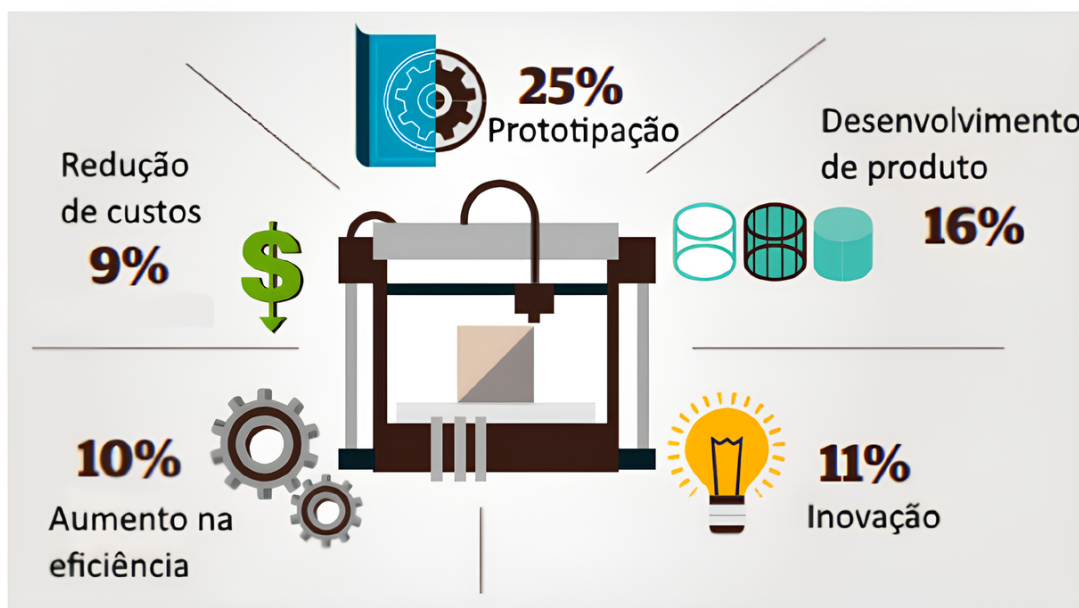
- Preparação do arquivo: O modelo 3D é convertido em um arquivo específico para impressão 3D, no formato .STL.
- Fatiamento em software CAM: Após simulações e definições de parâmetros de impressão, é realizado o fatiamento da peça, gerando o g-code para impressão.
- Configuração e preparação da impressora: A impressora 3D é configurada, incluindo a seleção do material a ser utilizado (como plástico, metal, resina, entre outros) e a preparação da plataforma de impressão.
- Fabricação da peça: A impressora 3D constrói o objeto camada por camada, seguindo as instruções do arquivo preparado.
- Remoção da peça do equipamento: A peça impressa é removida da mesa de forma manual, podendo necessitar do auxílio de espátula por exemplo.
- Pós-processamento: Após a conclusão da impressão, podem ser necessárias etapas adicionais, como remoção de suportes de impressão, acabamento superficial, lixamento, pintura ou polimento para obter o resultado desejado.
- Utilização da peça impressa

Em relação aos materiais utilizados, a princípio, todos que podem ser fundidos e ressolidificados podem ser usados (STUCKER, 2015), mas o mais utilizado para impressão 3D são polímeros termoplásticos disponibilizados enrolados em bobinas (DUTRA, 2021).

Termoplástico é o termo que se refere a materiais que são projetados para se fundirem quando submetidos ao calor, tornando-os ideais para diversos processos que requerem controle de temperatura, como moldagem, extrusão e impressão 3D (LADCHUMANANDASIVAM, 2015). Os mais utilizados em impressões 3D são PLA, ABS, PETG (PET, PTT) e nylon (SIEBEN, 2017). Podem ser utilizados também materiais como Poliestireno (PS), Policarbonato (PC), flexíveis Elastômero Termoplástico TPE, TPN e TPC, e o Poliacetato de Vinila (PVA) (DUTRA, 2021).

Johnson (2018) extratifica a utilização da impressão por finalidade, sendo os percentuais das principais aplicações apresentados na Figura 5, mostrando a importância da tecnologia na prototipação, desenvolvimento de produtos, inovação, aumento de eficiência e redução de custos.

Figura 5 – Principais razões da utilização da impressão 3D.

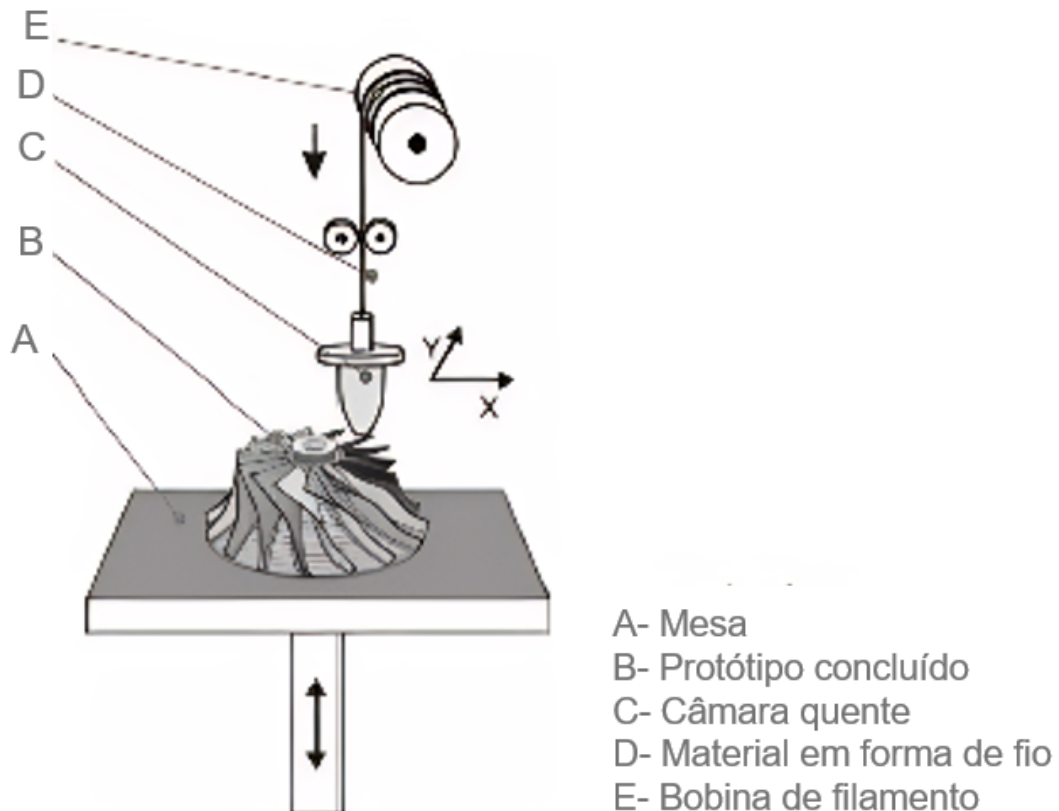


Fonte: Adaptado de Johnson (2018).

A utilização da tecnologia de impressão 3D tem potencial de agilizar o desenvolvimento e entrega de produtos personalizados, oferecendo maior flexibilidade através de uma gestão mais eficiente de estoques e produção em tempo real para atender à demanda variável. Além disso, a impressão 3D proporciona vantagens na fabricação de pequenos lotes, redução de custos em determinadas aplicações e uma notável flexibilidade em novos mercados. Contudo, é fundamental considerar as necessidades e prioridades para tomar a decisão entre a impressão 3D e a fabricação tradicional, pois, existem benefícios e compensações (JOHNSON, 2018).

Existem várias tecnologias de impressão 3D, as mais utilizadas são: FDM ou FFF, SLA, DLP, SLS e SLM. As diferenças entre esses tipos de tecnologia estão no material que elas utilizam e na maneira como são construídas as camadas para formar os objetos impressos (NOGUEIRA, 2021). Impressão 3D FDM (Fused Deposition Modeling) é um processo de fabricação aditiva que permite criar objetos tridimensionais camada por camada, representado na Figura 6. O sistema FDM utiliza uma câmara de aquecimento para fundir o polímero que é introduzido no sistema sob a forma de um filamento. O filamento é empurrado para dentro da câmara por uma polia, e é esta força que gera a pressão de extrusão através de um cabeçote que se desloca em duas direções horizontais, representadas pelos eixos X e Y, que é responsável por depositar o filamento fundido. Enquanto isso acontece, a plataforma se movimenta para baixo ou para cima, representando o eixo Z (STUCKER, 2015; LUZ, 2019).

Figura 6 – Esquema de uma impressora 3D FDM.

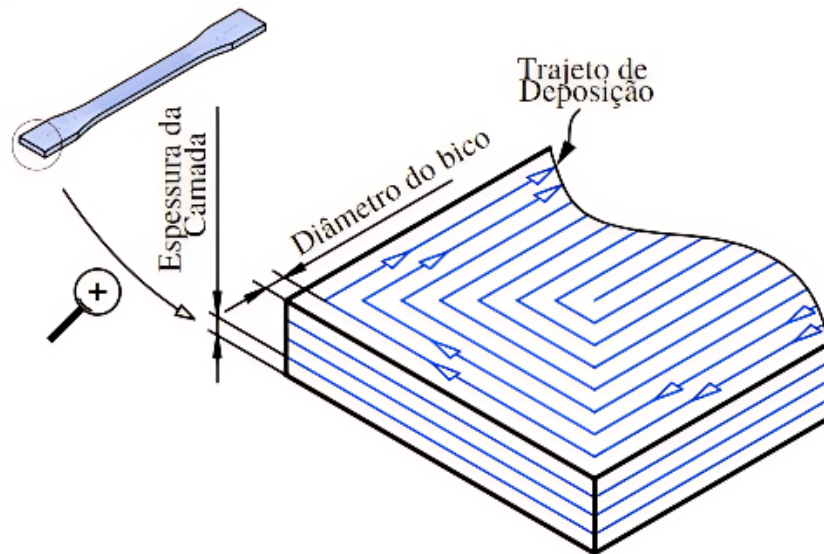


Fonte: Dutra (2021).

Os ajustes dos parâmetros de impressão desempenham um papel fundamental na configuração do processo em um dispositivo FDM, são muitas variáveis na impressão 3D, mas as mais relevantes, devido às suas influências significativas nos resultados da impressão são: a temperatura de extrusão, a altura de camada, a velocidade de impressão e a orientação da peça no espaço de impressão (MACHADO, 2019). Além desses, há outros parâmetros de impressão que podem ser ajustados durante o processo, como a distância entre os filamentos, a largura do preenchimento e do contorno, o percentual de preenchimento, os padrões de preenchimento, a orientação das camadas e a temperatura de aquecimento da mesa (QURESHI, 2018).

- Espessura de camada: A Figura 7 ilustra a deposição das camadas, sendo a espessura da camada o resultado da quantidade de material depositado verticalmente por camada, sendo a espessura sempre igual ou menor que o diâmetro do bico extrusor. Camadas mais finas têm mais área de contato entre elas, afetando a força de adesão. Isso impacta diretamente na resistência à tração, sendo que camadas mais finas geralmente resultam em uma maior resistência (ALVES, 2021).

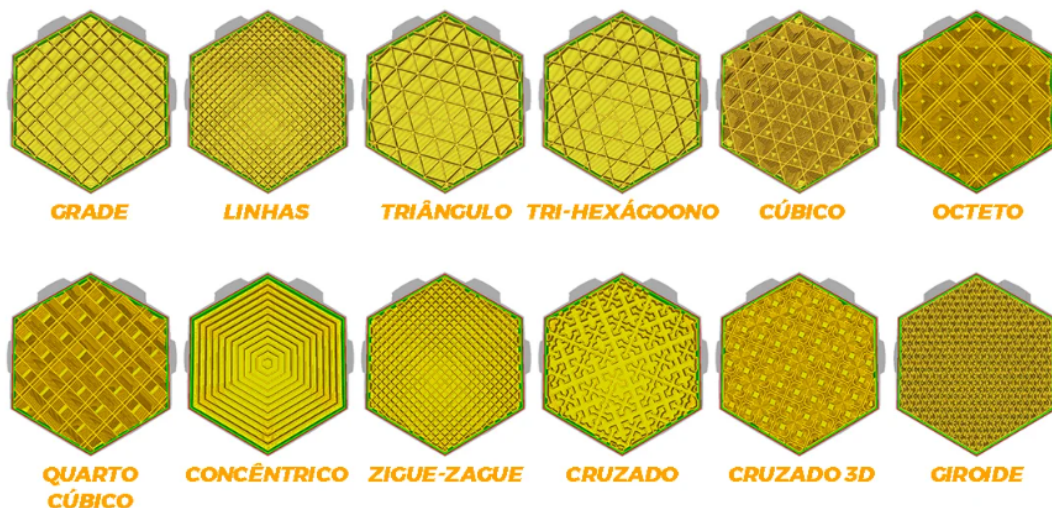
Figura 7 – Esquema da deposição de camadas.



Fonte: ALVES (2021).

- Perfil de preenchimento: Essencialmente, são padrões de diferentes formas geométricas que ocupam o interior dos objetos impressos em 3D. A variedade desses padrões é determinada pelo software de fatiamento utilizado para preparar o modelo para a impressão (ALVES, 2021). Na Figura 8 são demonstrados alguns perfis de preenchimento utilizados pelo software de fatiamento utilizado neste trabalho, o Ultimaker Cura:

Figura 8 – Padrões de preenchimento do software Ultimaker Cura.

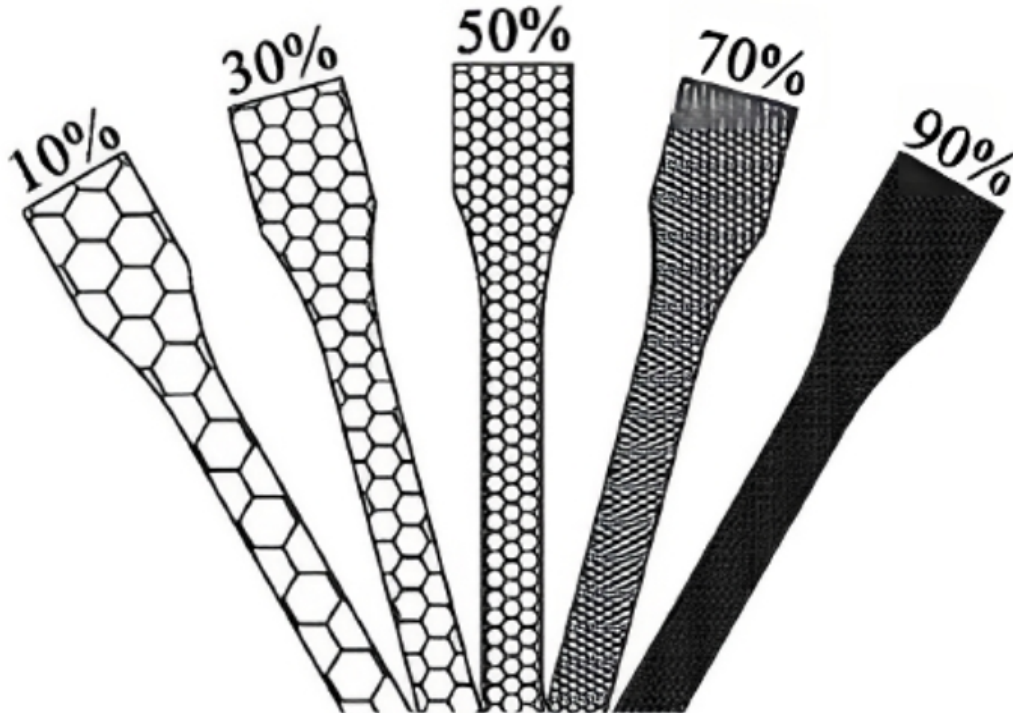


Fonte: 3DLab (b).

- Densidade de preenchimento: A densidade de preenchimento indica o quanto de material será usado para preencher o interior do objeto impresso. Quanto menor o preenchimento, menor o tempo de impressão, peso do objeto e em termos gerais, menores resistências

à tração são esperadas (ALVES, 2021). A Figura 9 ilustra variações nas densidades de preenchimento.

Figura 9 – Densidade de preenchimento.



Fonte: 3DLab (b).

2.2 Nylon e suas propriedades

O nylon é um tipo de poliamida, um polímero termoplástico composto por segmentos de polietileno (CH_2) separados por unidades de grupos amida (NH_2). Normalmente, as poliamidas são fabricadas através da reação de condensação entre um diácido e uma diamina. No entanto, também é possível sintetizá-las a partir de um aminoácido ou de uma lactama correspondente (LISBOA, 2022). Inicialmente utilizado como fibra sintética, logo encontrou aplicações na fabricação de plásticos, tornando-se uma das primeiras resinas empregadas na engenharia devido às suas excelentes propriedades mecânicas e ao fato de ser um termoplástico com baixa densidade e elevada estabilidade térmica. Além disso, o nylon possui características que o tornam indispensável na engenharia, tais como resistência ao desgaste, coeficiente de atrito relativamente baixo e boa resistência mecânica. Por esses motivos, o nylon é considerado um dos termoplásticos mais importantes do mundo e é extremamente versátil em suas aplicações (PLASTIREAL IND E COM. DE PLÁSTICOS LTDA, 2023).

Existem vários tipos de nylons, cada um com propriedades e características específicas adequadas para diferentes aplicações, que são diferenciados por suas nomenclaturas (Tabela 1). Os nylons apresentam variações no número de átomos de carbono presentes em seus constituin-

tes iniciais, e são designados com nomes seguindo o padrão "PAm,n"(por exemplo, AABB). Nessa nomenclatura, "m"indica o número de átomos de carbono na diamina de origem, enquanto "n"representa o número de carbonos no diácido de origem. Por outro lado, a designação "PAn"indica que a poliamida tem origem a partir de um aminoácido, sendo que "n"representa o número de carbonos no composto de origem (LISBOA, 2022), como exemplo: PA 4,6, PA 6, PA 6,6, PA 7, PA 11 e PA 12. A disposição dos grupos amida ao longo da cadeia do polímero é um fator essencial que influencia as propriedades de cada tipo de poliamida. Quanto menor for a distância entre os grupos amida, maior será a quantidade destes nos polímeros com cadeias de tamanho semelhante. Assim, as poliamidas que possuem grupos amida mais próximos apresentam uma energia coesiva mais elevada em comparação às poliamidas com sequências metilênicas mais longas. Conseqüentemente, essas poliamidas possuem maior densidade, rigidez, resistência à tração e compressão, temperatura de fusão e resistência ao calor, maior capacidade de resistir a hidrocarbonetos e maior capacidade de absorção de umidade (TRAJANO, 2016).

Tabela 1 – Propriedades das Poliamidas

Propriedade	Unidade	PA 4,6	PA 6,6	PA 6	PA 6,10
Densidade	g/cm ³	1,18	1,14	1,13	1,09
Grau de cristalinidade (aprox.)	%	70	50	50	
Temperatura de fusão	°C	295	264	215	215
Temperatura de transição vítrea	°C	80	65	58	50
Absorção de umidade (em 50% RH)	%	3,7	2,3	2,8	1,3

Fonte: Trajano (2016).

Os nylons mais comumente utilizados são PA 6,6 e PA 6. O PA 6,6 é fabricado utilizando-se uma diamina de 6 carbonos, chamada hexametilenodiamina, e um diácido de 6 carbonos, conhecido como ácido adípico. Por outro lado, o PA 6 é sintetizado a partir da caprolactama, uma lactama que possui 6 carbonos (LISBOA, 2022). A principal distinção entre eles está em suas propriedades térmicas e mecânicas. O PA 6,6 apresenta uma rigidez e resistência excepcionais, sendo capaz de suportar temperaturas de até 180°C em condições de trabalho intermitente. Já o PA 6 é mais flexível, porém não é adequado para temperaturas de trabalho acima de 130°C (PLASTIREAL IND E COM. DE PLÁSTICOS LTDA, 2023).

Em geral, o nylon é utilizado em sua grande parte em aplicações na forma de fibras para tecidos e cabos para pneus, cerca de 90% de sua produção, os 10% restantes são utilizados como material de engenharia na fabricação de peças como mancais e engrenagens, devido às boas propriedades mecânicas e baixo coeficiente de atrito (GROOVE, 2014). O nylon é um dos três mais importantes plásticos de engenharia, sendo o nylon 6, conhecido pela sua boa resistência mecânica, à fadiga, à abrasão e ao seu baixo coeficiente de fricção, resultando na utilização em larga escala na indústria automotiva, linha branca, embalagem de alimentos ou roupas e materiais

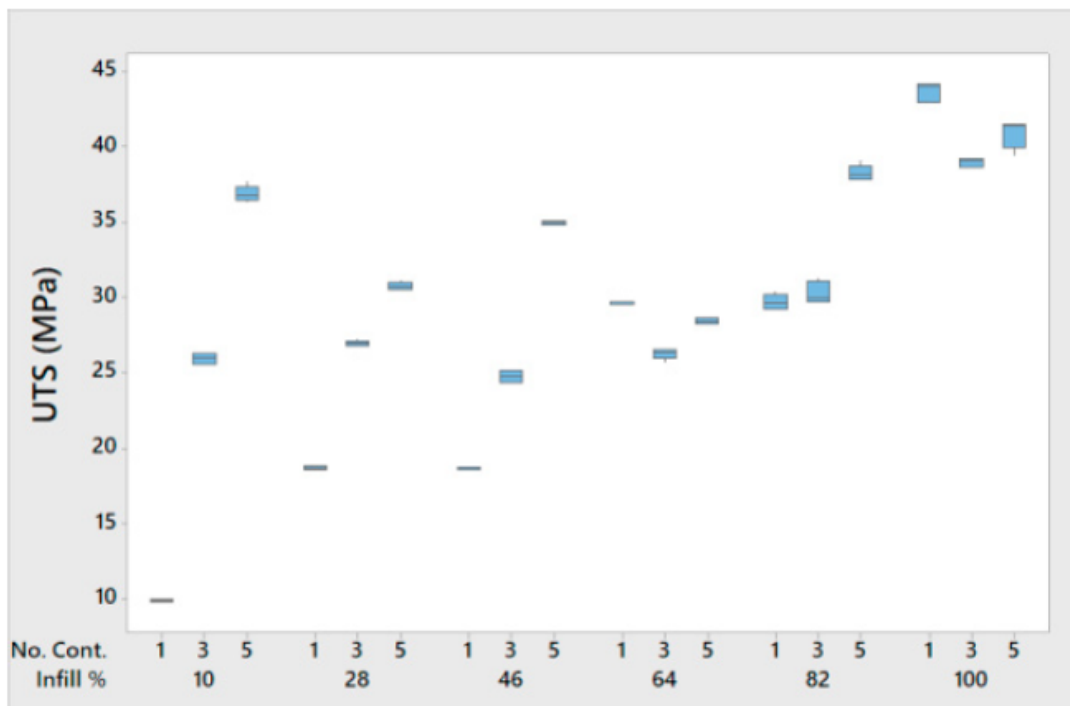
esportivos (MANO, 1991).

2.3 A impressão FDM em substituição à Usinagem

A substituição da fabricação por usinagem pela impressão FDM tem sido objeto de estudo e interesse crescente em vários setores industriais. Essa mudança é impulsionada pelos avanços na tecnologia de impressão 3D, que permite a fabricação de peças complexas com rapidez e custo reduzido, especialmente em baixos volumes de produção. Nesse contexto, a comparação de características mecânicas e elétricas entre o nylon produzido através da impressão 3D e o nylon usinado são questões relevantes para avaliação da viabilidade dessa substituição.

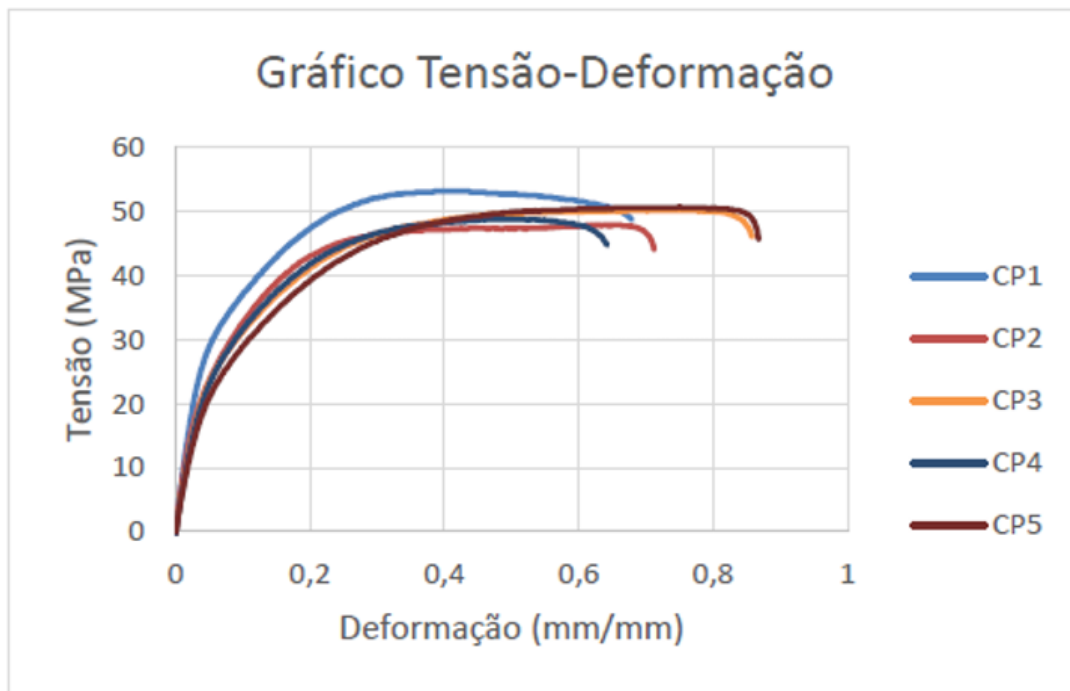
A análise comparativa da caracterização mecânica envolve a avaliação das propriedades do material, como resistência à tração, módulo de elasticidade, tenacidade e dureza. Estudos como o de Qureshi (2018) e o de Martins (2018) têm demonstrado que o nylon 12 impresso apresenta propriedades mecânicas comparáveis ao nylon 12 usinado. Na 10, Qureshi (2018) encontra limites de resistência à tração superiores a 40 MPa em corpos de prova impressos com a densidade de preenchimento de 100%, valores próximos aos encontrados por Martins (2018) e ilustrados na 11, que obteve em seus ensaios limites de resistência à tração entre 45 MPa e 55 MPa. No entanto, o presente trabalho será realizado com nylon 6, cujas características serão avaliadas comparativamente.

Figura 10 – Limites de resistência à tração de amostras de nylon impresso.



Fonte: Qureshi (2018).

Figura 11 – Curvas tensão x deformação de amostras de nylon usinado.



Fonte: Martins (2018).

Quando trata-se da substituição da fabricação por usinagem pela impressão FDM vários fatores devem ser considerados. A usinagem tradicional requer a fabricação de ferramentas específicas e tem um tempo de configuração mais longo, o que pode ser ineficiente e custoso para produções em baixa escala. A impressão FDM, por outro lado, permite a produção direta de peças sem a necessidade de ferramentas ou moldes, reduzindo os custos de fabricação e os prazos de entrega, somando-se à maior flexibilidade de design e à capacidade de produzir peças personalizadas sem custos adicionais significativos.

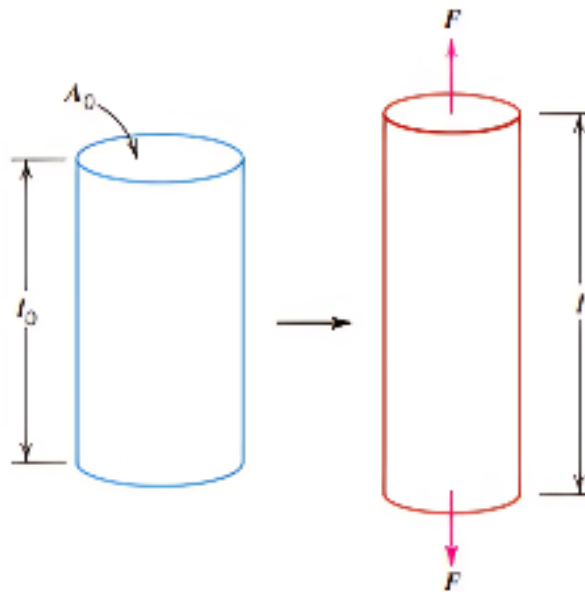
2.4 Ensaio de tração

Ao serem utilizados, os materiais estão sujeitos a diferentes tipos de forças ou cargas, por isso é fundamental compreender suas propriedades e projetar os componentes de maneira que a deformação causada não seja exagerada nem leve à ruptura. O comportamento mecânico de um material revela sua resposta à aplicação de uma carga ou força. Entre as principais propriedades mecânicas relevantes estão a rigidez, resistência, dureza, ductilidade e tenacidade. Essas características são determinadas através de experimentos de laboratório, cuidadosamente estruturados para simular o mais fielmente possível as condições reais de uso. É importante considerar fatores como o tipo de carga aplicada, a duração dessa aplicação e as condições ambientais. A carga pode ser de tração, compressão ou cisalhamento, com intensidade constante ou variável ao longo do tempo, e o período de aplicação pode variar significativamente. Quando uma carga é estática ou muda de forma relativamente lenta ao longo do tempo, sendo distribuída

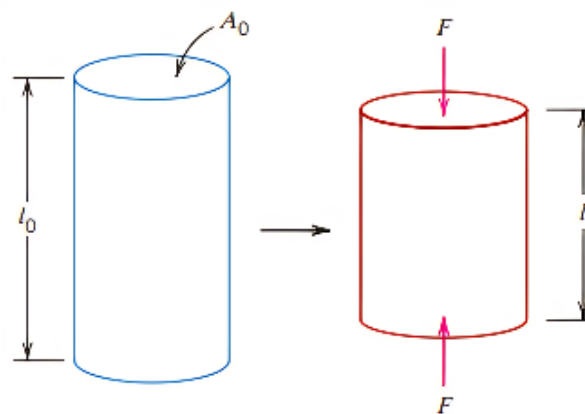
de maneira uniforme sobre a superfície ou a seção transversal de um elemento, o comportamento mecânico pode ser analisado por meio de um ensaio tensão-deformação simples. As três principais formas de aplicação de carga, ilustradas na Figura 12, são: tração, compressão e cisalhamento (CALLISTER, 2018).

Figura 12 – Principais aplicações de cargas.

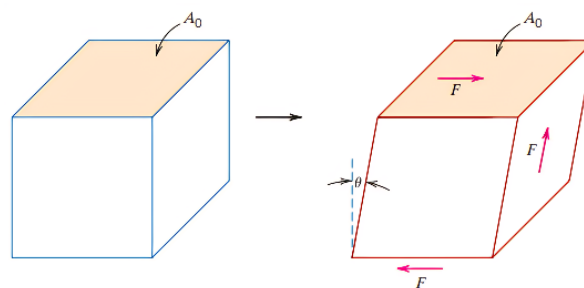
(a) Ilustração do alongamento em tração.



(b) Ilustração da contração em compressão.



(c) Ilustração da deformação cisalhante.

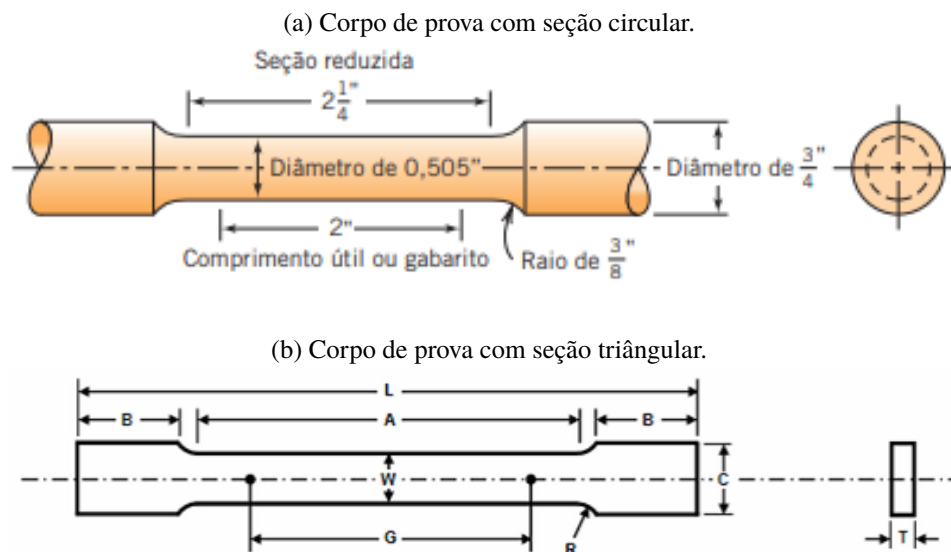


Fonte: Callister (2018)

Callister (2018) descreve que no ensaio de tração uma amostra é deformada, normalmente

até sua fratura, por uma carga de tração que é aumentada gradativamente e é aplicada uniaxialmente ao longo do eixo de um corpo de prova. Ele também diz que este corpo de prova pode ser na forma de um osso de cachorro, com a seção transversal circular ou retangular, ilustrados na figura 13. Segundo o autor, a escolha desse formato de corpo de prova, semelhante a um "osso de cachorro", foi feita porque durante os testes, a deformação se concentra na parte central mais estreita, que possui uma seção transversal uniforme ao longo de seu comprimento. Além disso, esse design ajuda a minimizar o risco de fratura nas extremidades do corpo de prova.

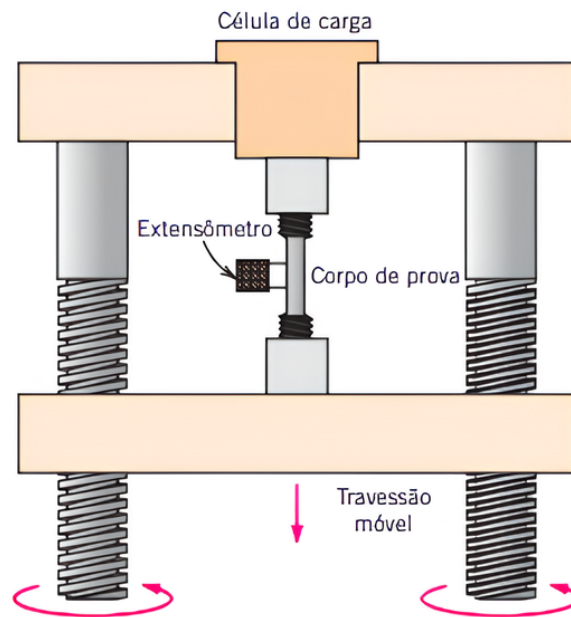
Figura 13 – Exemplos de corpo de prova para ensaio de tração.



Fonte: Callister (2018)

O corpo de prova é fixado pelas suas extremidades nas garras do equipamento de teste (Figura 14). A máquina de tração é projetada para esticar o corpo de prova a uma velocidade constante, enquanto mede, de forma contínua e simultânea, a força instantânea aplicada (por meio de uma célula de carga) e os alongamentos gerados (utilizando um extensômetro) (CALLISTER, 2018).

Figura 14 – Representação esquemática de uma máquina de ensaio de tração.



Fonte: Callister (2018).

Callister (2018) ainda diz que o resultado do ensaio de tração é apresentado por tensão em função da deformação, sendo a tensão calculada pela Equação 2.1:

$$\sigma = \frac{F}{A_0}, \quad (2.1)$$

O qual F é a carga instantânea aplicada perpendicularmente à seção transversal do corpo de prova, medida em newtons (N) ou libra-força (lbf). A_0 é a área da seção transversal original, antes da aplicação de qualquer carga, expressa em metros quadrados (m^2) ou polegadas quadradas (in^2). As unidades usadas para a tensão são megapascals (MPa) no Sistema Internacional de Unidades (SI), onde 1 MPa é igual a $10^6 N/m^2$, e libra-força por polegada quadrada (Psi), uma unidade comum nos Estados Unidos.

Na Equação 2.2 calcula-se a deformação, ϵ :

$$\epsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (2.2)$$

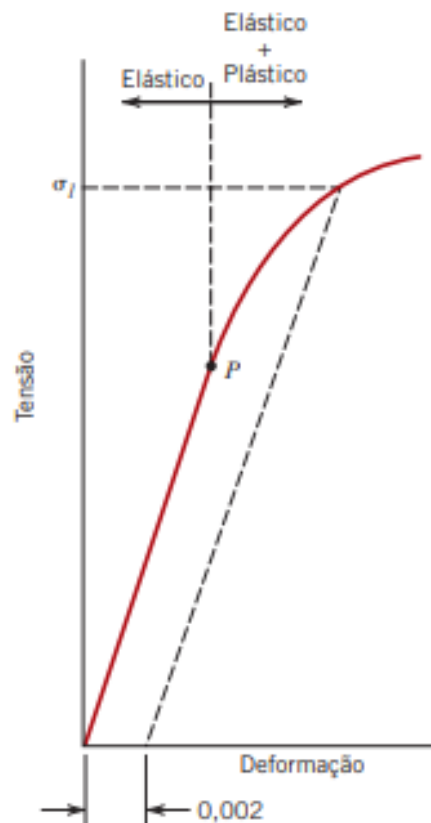
Sendo o comprimento original, antes da aplicação de qualquer carga, denotado por L_0 , enquanto L_i representa o comprimento instantâneo. Frequentemente, a diferença entre L_i e L_0 é representada por ΔL , que indica o alongamento ou a mudança no comprimento em um determinado momento em relação ao comprimento original. Ele também esclarece que a deformação não tem unidades próprias, mas os termos "metros por metro" ou "polegadas por polegada" são comuns, que o valor da deformação é, de fato, independente do sistema de unidades utilizado.

O comportamento tensão-deformação de materiais pode ser analisado nas fases de deformação elástica e deformação plástica (Figura 15), conforme descrito por Callister (2018). Na deformação elástica, o material retorna à sua forma original após a remoção da carga aplicada. Nesta fase, a relação entre tensão e deformação é linear, obedecendo à Lei de Hooke conforme Equação 2.3:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.3)$$

onde σ é a tensão, E é o módulo de elasticidade (módulo de Young), e ε é a deformação. A deformação elástica é reversível, e a energia armazenada durante essa fase é recuperada quando a força é removida (CALLISTER, 2018).

Figura 15 – Comportamento tensão-deformação típico de um metal..

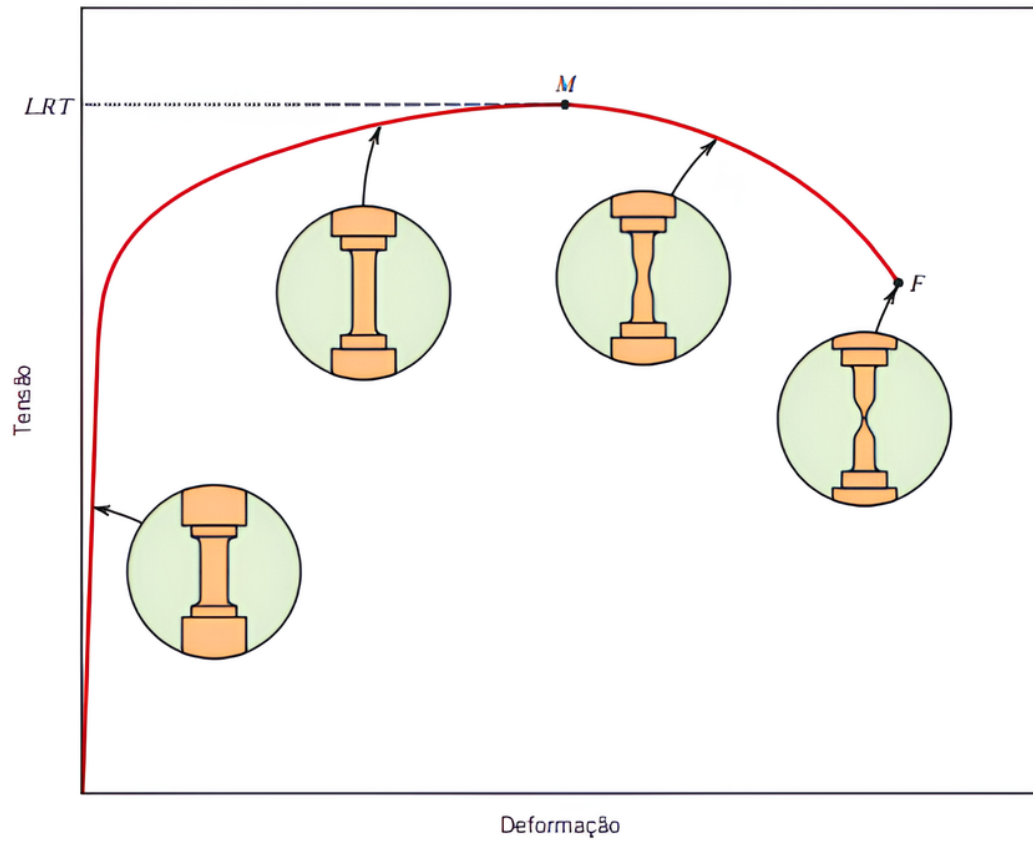


Fonte: Callister (2018).

A deformação plástica ocorre quando a tensão aplicada excede o limite de escoamento do material, resultando em uma deformação permanente. Nesta fase, a relação tensão-deformação deixa de ser linear. O início da deformação plástica é marcado pelo escoamento, que ocorre no limite de escoamento (σ_y), ponto a partir do qual o material passa a se deformar permanentemente. A resistência ao escoamento é definida como a tensão necessária para iniciar o escoamento do material. Após o escoamento, o material ainda pode suportar aumentos de carga até atingir o

limite de resistência à tração (Figura 16), que é a tensão máxima que o material pode suportar antes de sofrer fratura (CALLISTER, 2018).

Figura 16 – Comportamento típico da curva tensão-deformação de engenharia até a fratura.

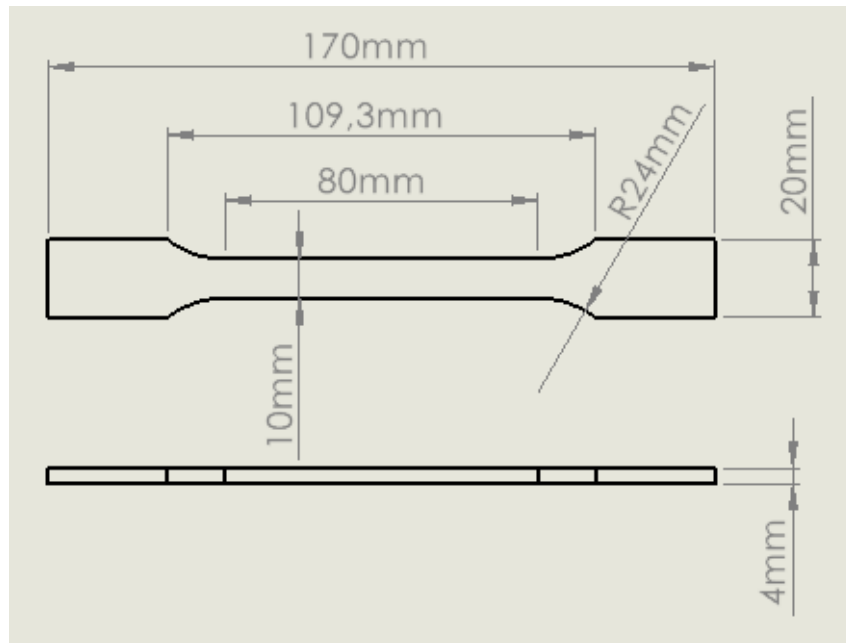


Fonte: Callister (2018).

3 METODOLOGIA

Foram impressos corpos de prova de acordo com a norma ISO 527-2-2012 cujas dimensões podem ser visualizadas na Figura 17, nos perfis linha, triangular e octeto, com densidades de preenchimento de 10%, 40%, 70% e 100%. O filamento utilizado foi o de nylon 6 para impressão 3D com 1,75 mm de diâmetro, do fabricante Dynalabs. Exemplos de amostras impressas são mostrados na Figura 18.

Figura 17 – Dimensões do corpo de prova padrão projetado no software SolidWorks.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura 18 – Exemplo de corpos de prova impressos em 3D.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Foi utilizada uma barra quadrada de 40mm x 40mm x 200mm de nylon 6 bruto da distribuidora Saf-Plast para usinagem dos corpos de prova para comparação com as amostras impressas. O filamento e a barra quadrada são mostrados na Figura 19.

Figura 19 – Filamento 1.75mm nylon 6 Dynalabs e barra quadrada Nylon 6 bruto para usinagem 40mm x 40mm x 200mm



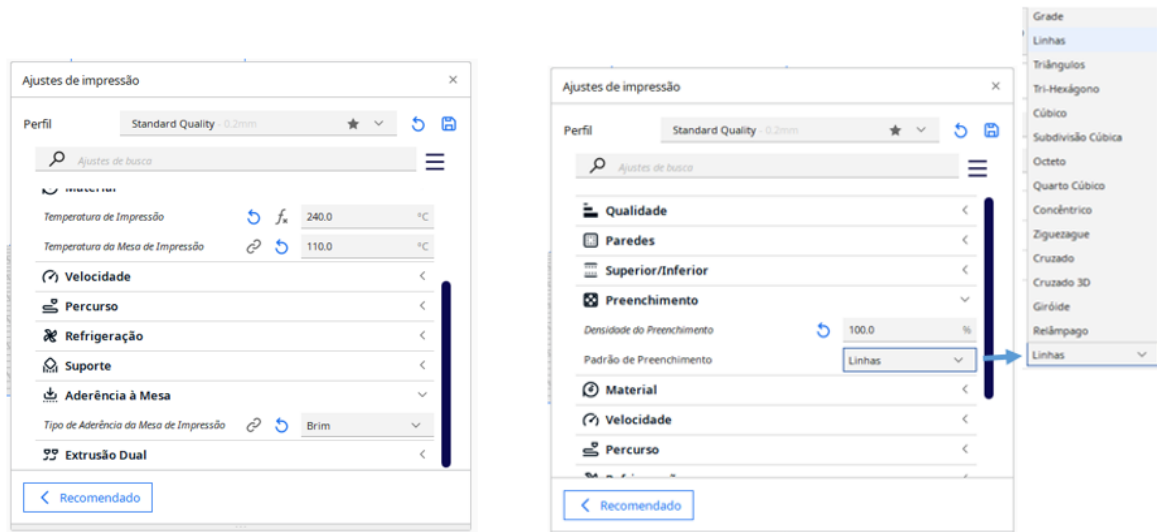
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Para modelagem das amostras de impressão e geração do arquivo STL foi utilizado o software SolidWorks, e para o fatiamento e geração do G-Code foi utilizado o Ultimaker Cura. Na Figura 20 são apresentados os parâmetros utilizados, como a temperatura de impressão, a temperatura da mesa, o auxílio de aderência à mesa e as variáveis adotadas no presente estudo: densidade e padrão de preenchimento. A recomendação do fabricante do filamento para as temperaturas ideais de trabalho para o nylon 6 são 240 °C no bico de extrusão e 110 °C na base da impressora, contudo, mesmo seguindo os parâmetros recomendados, após os primeiros testes, foi preciso utilizar fita adesiva e cola branca para ajudar na aderência do nylon à base, como apresentado na Figura 21.

Figura 20 – Parâmetros de impressão.

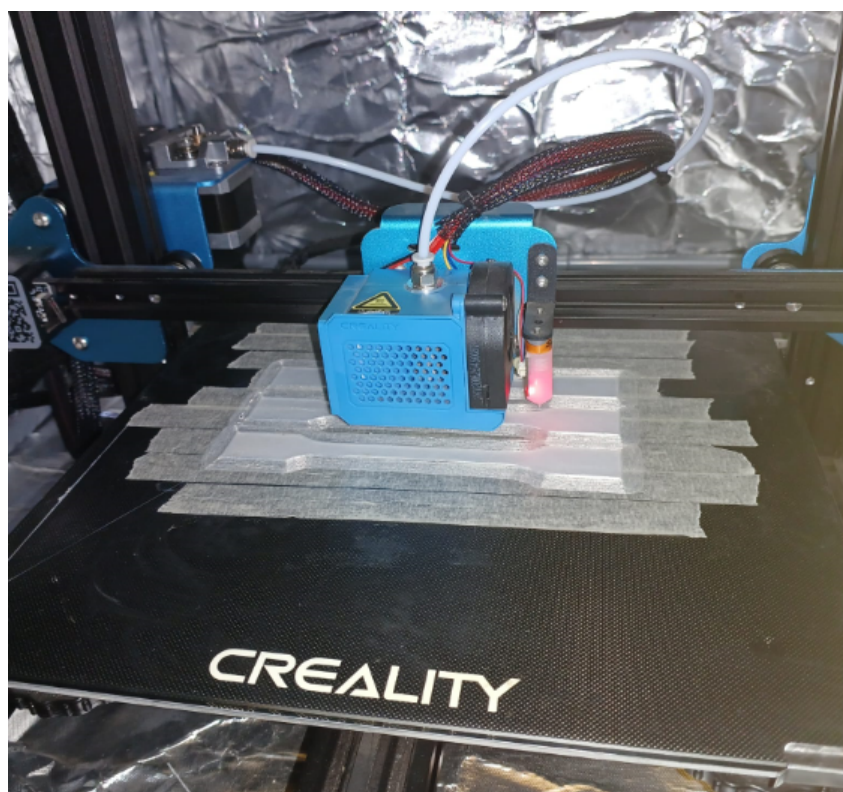
(a) Configurações de impressão.

(b) Configuração de preenchimento.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

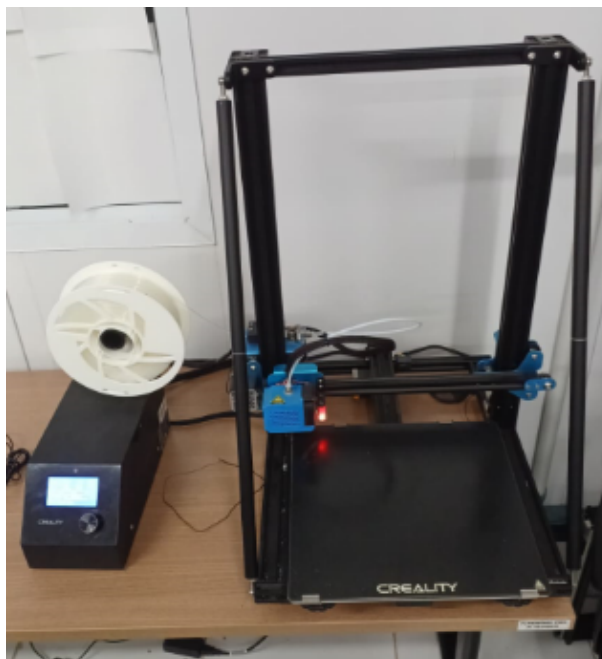
Figura 21 – Adaptação para ajudar na aderência à base da impressão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Foi utilizada uma impressora 3D FDM modelo Cr-10 v2, da marca Creality 3D disponibilizada pelo IFMG campus Betim, mostrada na Figura 22. Os corpos de prova impressos são exemplificados na Figura 18.

Figura 22 – Impressora 3D Cr-10 do fabricante Creality.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A amostra usinada foi fabricada manualmente no laboratório de usinagem do IFMG campus Betim em uma máquina fresadora ferramenteira Eurostec FTV1 mostrada na Figura 23.

Figura 23 – Fresadora ferramenteira Eurostec FTV1.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

4 RESULTADOS

4.1 Amostras de impressão 3D

4.1.1 Amostras com densidade de preenchimento 10%

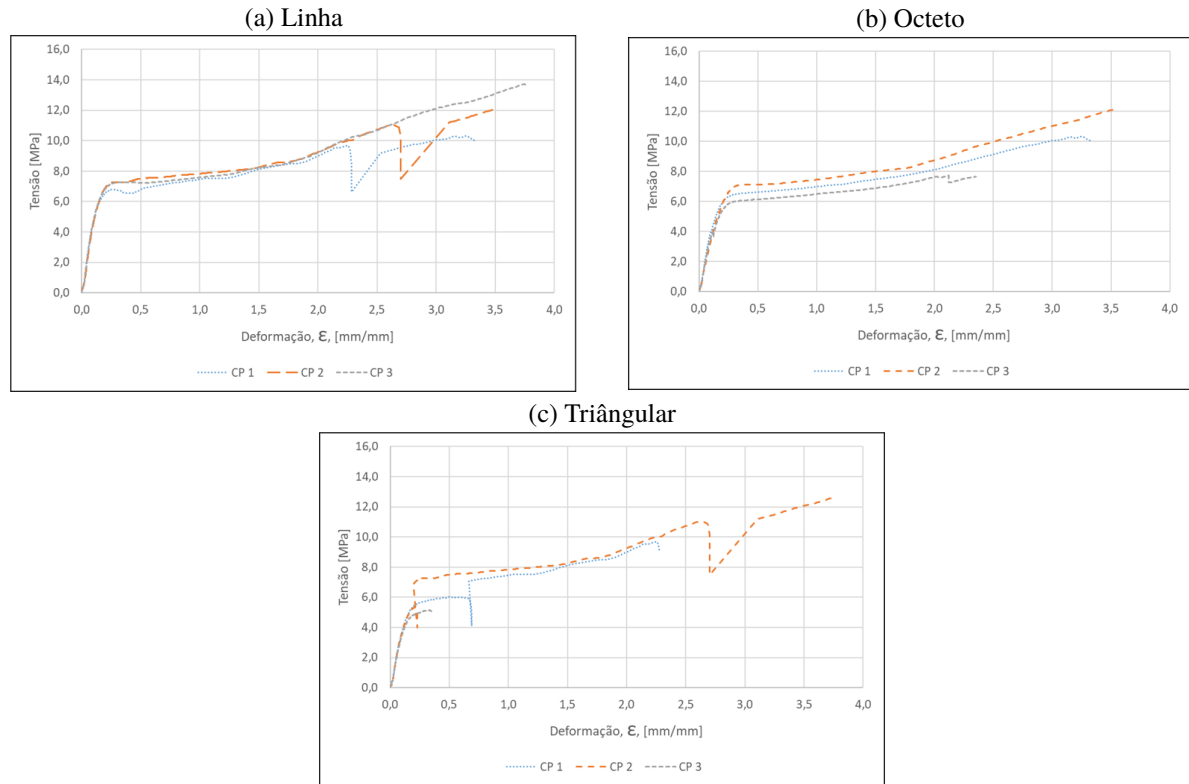
As massas, limites de escoamento, σ_{esc} , limites de resistência, σ_{res} e deformação, ε , são apresentados na Tabela 2. Com a densidade de preenchimento de 10%, o perfil linha atingiu maiores valores de limite de escoamento e resistência, sendo estes $7,05 \pm 0,25$ MPa e $11,96 \pm 0,84$ MPa, respectivamente. O pior desempenho foi obtido pelo perfil triangular, com limite de escoamento e resistência de $6,25 \pm 0,25$ MPa e $9,36 \pm 0,78$ MPa e com desempenho intermediário, o perfil octeto, apresentando $6,75 \pm 0,23$ MPa e $9,36 \pm 0,78$ MPa de limites de escoamento e resistência, respectivamente. O perfil octeto foi que o apresentou menor desvio dentre os perfis analisados com a densidade de preenchimento de 10%, e pode-se observar na Figura 24, que as curvas obtidas pela execução do ensaio de tração no perfil octeto (Figura 24 - b) são mais estáveis comparadas às obtidas no perfil linha ((Figura 24 - a) e triangular (Figura 24 - c). No perfil octeto foram obtidas curvas constantes, sem vales resultantes de quedas de tensão ao longo do ensaio já em regime de deformação plástica. O perfil linha apresentou esses vales resultantes de queda de tensão em tensões superiores a 9,5 MPa (Figura 24 - a), tensões superiores às apresentadas pelo perfil triangular, (Figura 24 - c), que apresentou vales já no início do ensaio, em regiões próximas ao limite de escoamento ($\tilde{6}$ MPa). As curvas sugerem que para os parâmetros de impressão utilizados e em densidades de preenchimento de 10%, há a formação de estruturas mais estáveis no perfil octeto, seguido pelo linha e mais instável, triangular. As quedas de tensão observadas sugerem a presença de deslizamentos das cadeias impressas nestes instantes até que haja acomodação destas e a nova estrutura acomodada se estabiliza e volta a resistir à trações mais elevadas.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas - Densidade de 10%.

Perfil de preenchimento	Massa (g)	σ_{esc} (MPa)	σ_{res} (MPa)	ε (mm/mm)
Linha	$7,22 \pm 0,17$	$7,05 \pm 0,25$	$11,96 \pm 0,84$	$3,49 \pm 0,33$
Octeto	$7,05 \pm 0,24$	$6,75 \pm 0,23$	$10,36 \pm 0,32$	$3,10 \pm 0,21$
Triangular	$7,00 \pm 0,05$	$6,25 \pm 0,25$	$9,36 \pm 0,78$	$2,13 \pm 0,87$

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura 24 – Amostras com densidade de preenchimento 10%.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

4.1.2 Amostras com densidade de preenchimento de 40%

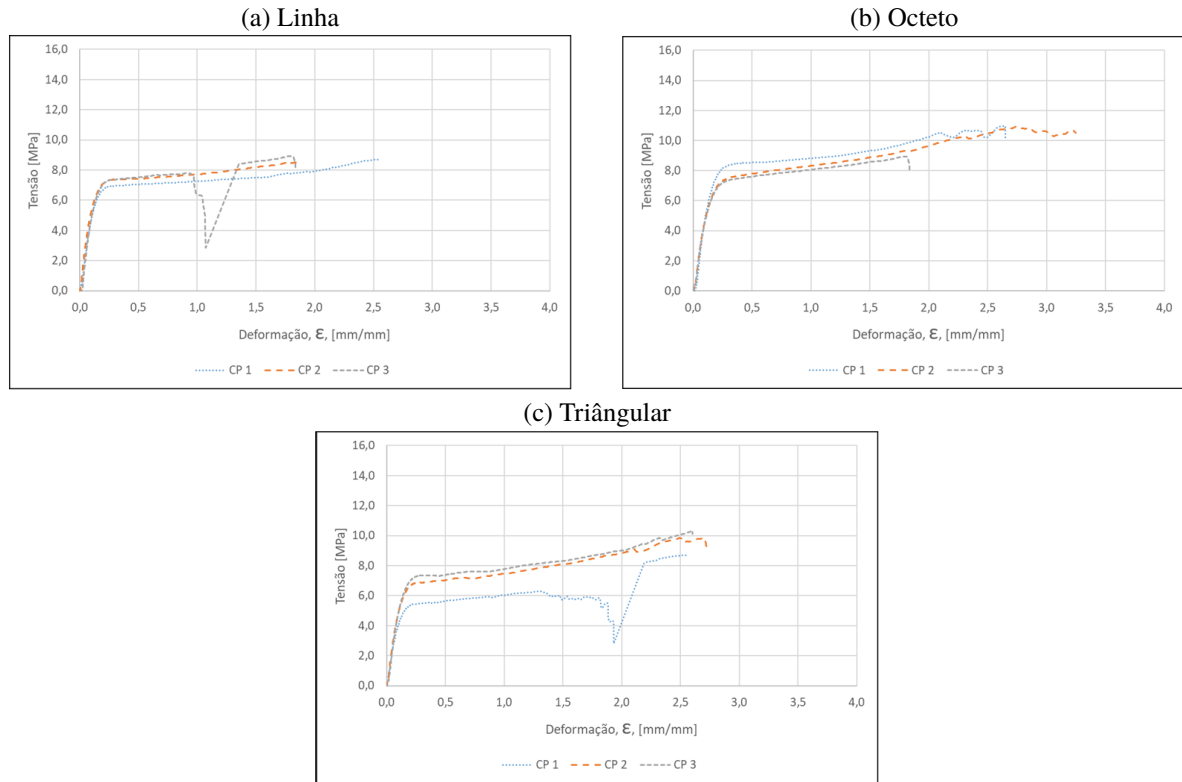
As propriedades obtidas são apresentadas na Tabela 3. Com a densidade de preenchimento de 40% o limite de escoamento dos perfis linha e triangular são muito próximos, sendo $6,17 \pm 0,47$ MPa e $6,23 \pm 0,56$ MPa, respectivamente, contudo, o perfil triangular resultou que maior limite de resistência à tração, $9,50 \pm 0,25$ MPa, contra $8,76 \pm 0,12$ MPa do perfil em linha. O perfil octeto apresentou melhor desempenho, com $7,92 \pm 0,85$ MPa e $10,43 \pm 0,54$ MPa de limite de escoamento e resistência. De forma análoga ao observado com densidade de 10%, as curvas obtidas nos ensaios realizados com 40% mostrados na Figura 25 sugerem que o perfil de preenchimento octeto resultou em estrutura mais estável (Figura 25 - b), pela ausência de vales na curva, resultante da queda de tensão durante o ensaio resultante da acomodação estrutural, que foi observado tanto no perfil linha (Figura 25 - a) e triangular (Figura 25 - b).

Tabela 3 – Propriedades mecânicas - Densidade de 40%.

Perfil de preenchimento	Massa (g)	σ_{esc} (MPa)	σ_{res} (MPa)	ϵ (mm/mm)
Linha	$8,01 \pm 0,02$	$6,17 \pm 0,47$	$8,76 \pm 0,12$	$2,06 \pm 0,58$
Octeto	$8,12 \pm 0,03$	$7,92 \pm 0,85$	$10,43 \pm 0,54$	$2,56 \pm 0,11$
Triangular	$8,34 \pm 0,17$	$6,23 \pm 0,56$	$9,50 \pm 0,25$	$2,64 \pm 0,67$

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura 25 – Amostras com densidade de preenchimento 40%.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

4.1.3 Amostras com densidade de preenchimento de 70%

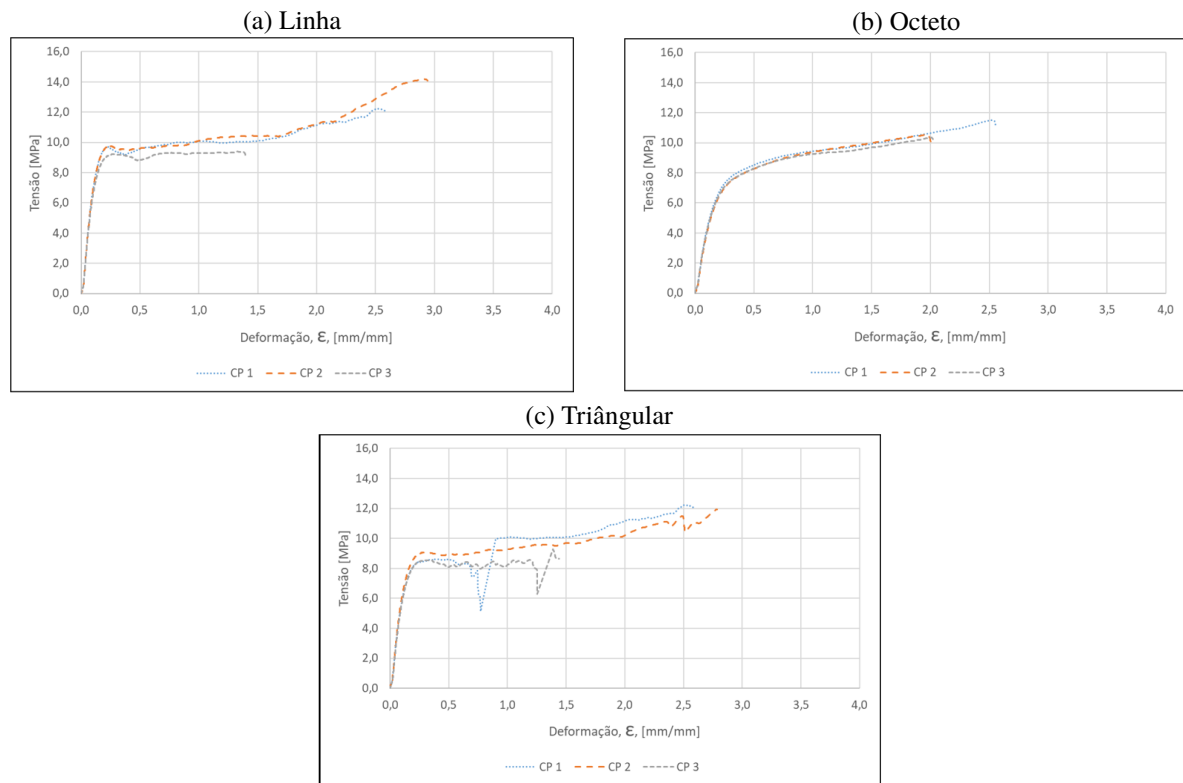
Na Tabela 4 é possível observar que os maiores valores de limites de escoamento e resistência foram obtidos para o perfil linha, de $9,03 \pm 0,87$ MPa e $11,96 \pm 0,83$ MPa, seguido pelo triangular com $8,16 \pm 0,38$ MPa e $11,11 \pm 0,96$ MPa e com menores patamares, o octeto, com $7,34 \pm 0,94$ MPa e $10,81 \pm 0,38$ MPa de limites de escoamento e resistência, respectivamente. Assim como o observado nas densidades de 10% e 40%, o perfil octeto (Figura 26 - b) se apresentou mais estável e com ausência de acomodações como observado nos perfis linha (Figura 26 - a) e triangular (Figura 26 - c).

Tabela 4 – Propriedades mecânicas - Densidade de 70%.

Perfil de preenchimento	Massa (g)	σ_{esc} (MPa)	σ_{res} (MPa)	ϵ (mm/mm)
Linha	$10,14 \pm 0,07$	$9,03 \pm 0,87$	$11,96 \pm 0,83$	$2,23 \pm 0,88$
Octeto	$10,23 \pm 0,11$	$7,34 \pm 0,94$	$10,81 \pm 0,38$	$2,16 \pm 0,17$
Triangular	$10,17 \pm 0,05$	$8,16 \pm 0,38$	$11,11 \pm 0,96$	$2,13 \pm 0,28$

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura 26 – Amostras com densidade de preenchimento 70%.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

4.1.4 Amostras com densidade de preenchimento de 100%

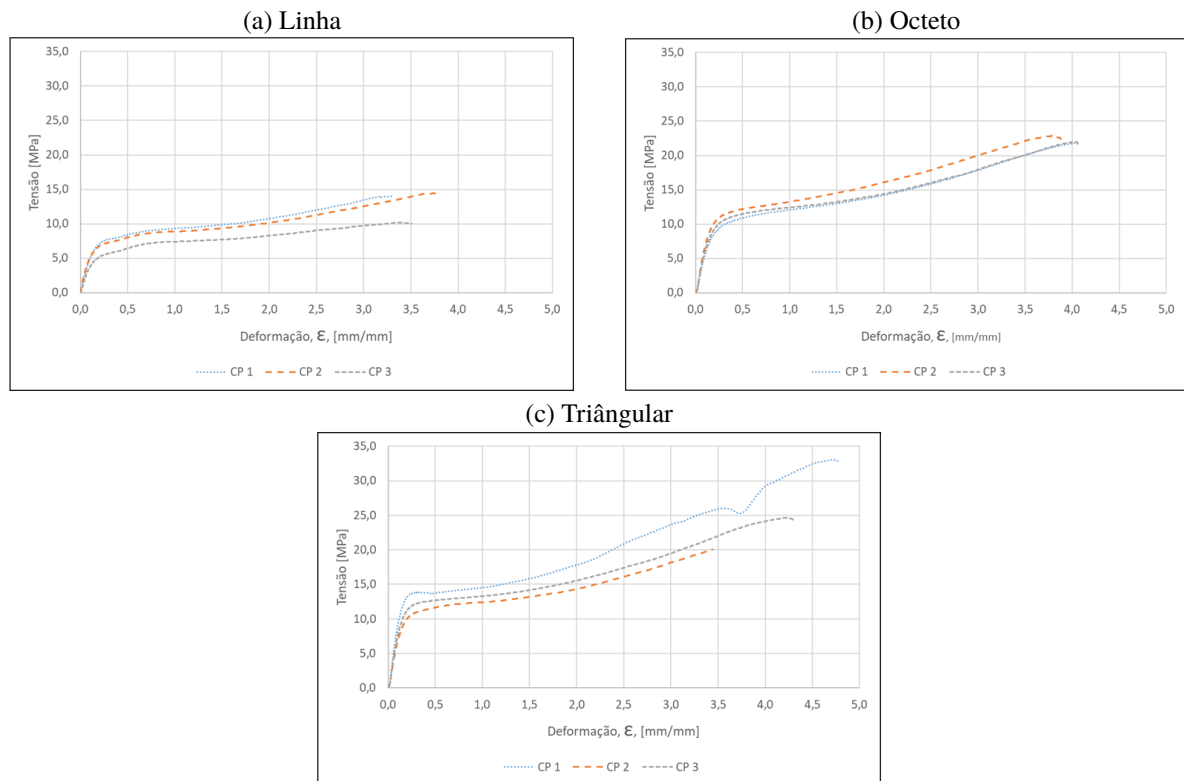
Na Figura 27 é possível observar que com a densidade de 100% os três perfis apresentaram curvas estáveis, com a ausência de vales provocados por quedas de tensão durante o ensaio originados por acomodações estruturais, sendo então a condição adequada de impressão para os parâmetros adotados. Os perfis triangular e octeto apresentaram valores próximos de escoamento, sendo estes $11,43 \pm 0,18$ MPa e $10,16 \pm 0,86$ MPa, respectivamente, contudo, para o limite de resistência, o perfil triangular apresentou maiores patamares, resultando na média de $26,36 \pm 0,45$ MPa contra $21,96 \pm 0,26$ MPa resultante do octeto. O perfil linha, apesar de também não ter apresentado patamares de acomodação, resultou em baixos limites de escoamento e resistência, $5,33 \pm 0,29$ MPa e $12,83 \pm 0,52$ MPa, médias inferiores a 50% das obtidas no perfil triangular.

Tabela 5 – Propriedades mecânicas - Densidade de 100%.

Perfil de preenchimento	Massa (g)	σ_{esc} (MPa)	σ_{res} (MPa)	ϵ (mm/mm)
Linha	$11,84 \pm 0,67$	$5,33 \pm 0,29$	$12,83 \pm 0,52$	$3,5 \pm 0,15$
Octeto	$11,81 \pm 0,51$	$10,16 \pm 0,86$	$21,96 \pm 0,26$	$3,93 \pm 0,79$
Triangular	$11,88 \pm 0,27$	$11,43 \pm 0,18$	$26,36 \pm 0,45$	$4,13 \pm 0,04$

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura 27 – Amostras com densidade de preenchimento 100%.

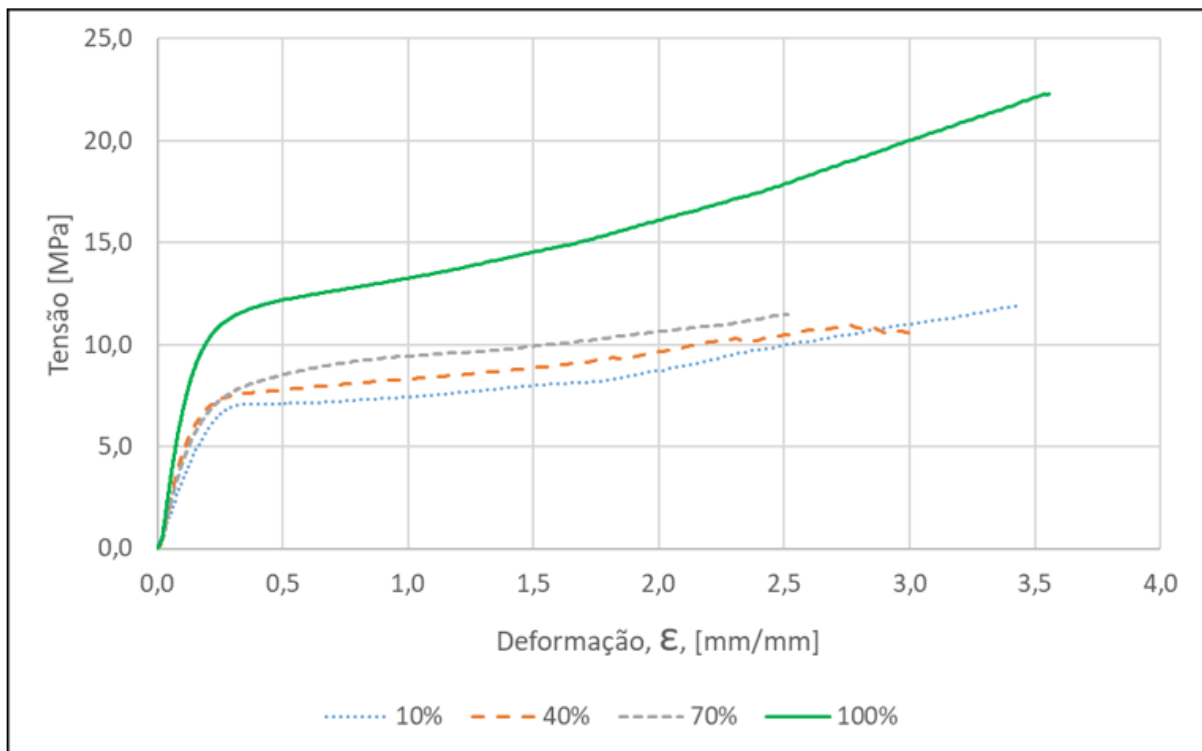


Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

4.2 Influência da densidade de preenchimento e comparativo com amostras usadas.

O perfil octeto, devido à sua simetria em várias direções, tende a oferecer maior estabilidade estrutural, e em razão disso, se mostrou mais estável considerando todas as densidades de preenchimento adotadas. Portanto, foram plotadas na Figura 28 as curvas obtidas a partir de uma amostra mais representativa dentre as três ensaiadas em cada condição. Nota-se que houve tendência de aumento de resistência à tração em função do aumento das densidades de preenchimento, contudo, o aumento entre 10% e 70% se apresentaram modestos, não justificando o maior gasto com material. Comparando a densidade de preenchimento de 100% com as demais, além da maior estabilidade e ausência de acomodações, houve ganho de resistência significativo de resistência à tração. Como pode ser observado nas curvas apresentadas na Figura 28, o limite de resistência obtido na curva com densidade de 100% atinge limite de resistência $a \approx b$ 22,5 MPa contra $a \approx b$ 11,5 MPa obtidos com a densidade de 70%.

Figura 28 – Resistência à tração em função das densidades de preenchimento.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A amostra usinada apresentou uma massa de 10,20 g, limite de escoamento 42,02 MPa, limite de resistência à tração de 58,59 MPa (Tabela 6), na Figura 29 observa-se a formação de patamar de escoamento bem definido, a ausência de quedas de tensão resultantes da acomodação como as observadas em peças impressas e que o valor da resistência à tração foi crescente até à ruptura, sendo o limite de resistência coincidente com a tensão de ruptura. Os valores e comportamentos são análogos aos obtidos por Martins (2018) e mostrados na Figura 11, indicando limites de resistência à tração entre 45 MPa e 55 MPa em nylon usinado, contudo, a deformação obtida no presente trabalho, de 3,68 mm/mm é significativamente maior do que as indicadas pelo autor, estando elas entre 0,6 mm/mm e 0,9 mm/mm.

Tabela 6 – Propriedades mecânicas - Amostra usinada

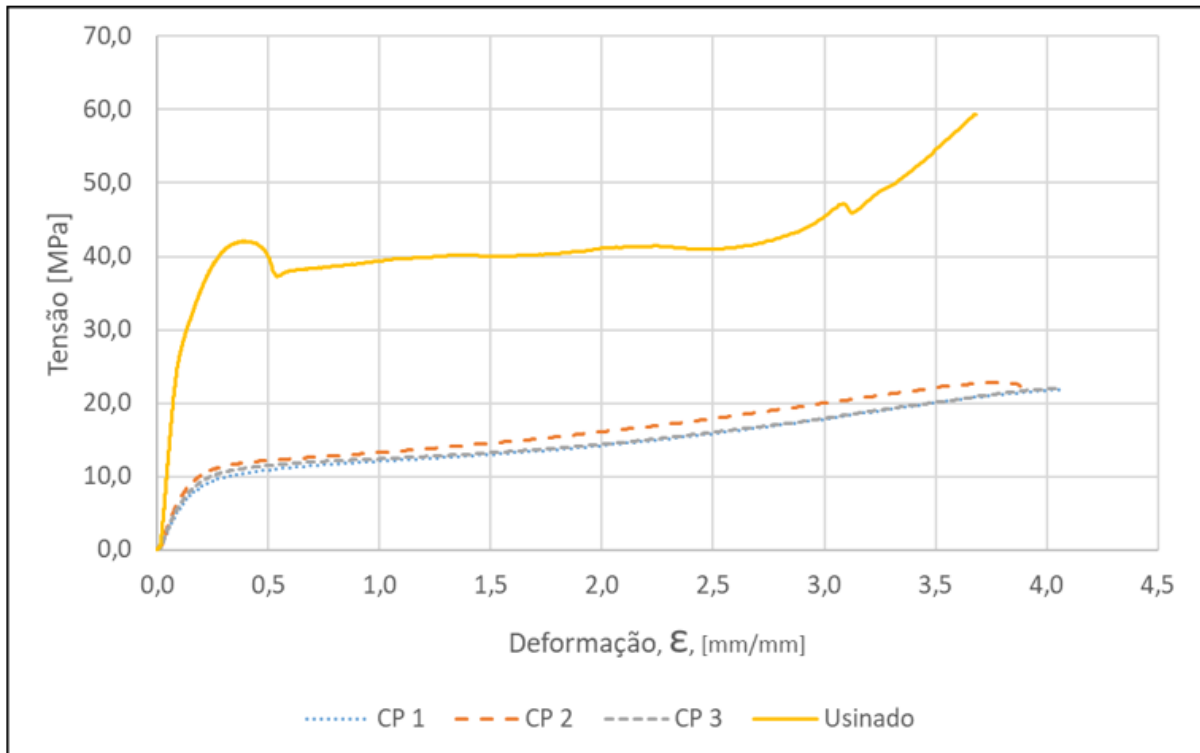
Massa (g)	σ_{esc} (MPa)	σ_{res} (MPa)	ϵ (mm/mm)
10,20	42,02	58,59	3,68

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Na Figura 29 é possível comparar os desempenhos da amostra usinada com uma média das curvas obtidas das amostras com densidade de preenchimento 100% com perfil octeto. Os ensaios de tração realizados no presente trabalho resultaram em limites de resistência inferiores aos obtidos por Qureshi (2018) e mostrados na Figura 10 para densidade de preenchimento de 100%, que chegaram a superar 40 MPa, ou seja, resistências equivalentes às obtidas por Martins

(2018) e o presente estudo para amostras usinadas. A condição impressa mostrada na Figura 29 apresentou um bom desempenho, chegando a quase 50% do limite de resistência obtido da peça usinada, podendo ser viável a substituição do processo de usinagem por impressão FDM à depender da resistência mecânica requerida.

Figura 29 – Resistência à tração da amostra usinada e média com densidades de preenchimento de 100% com perfil octeto.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

5 CONCLUSÃO

A impressão em nylon 6 com a temperatura de extrusão de 240 °C e mesa a 110°C pode ter apresentado possíveis falhas de preenchimento em densidades de preenchimento diferentes de 100%, pois, durante os ensaios de tração realizados foram identificados vales nas curvas obtidas resultantes de quedas significativas de tensão ao longo dos ensaios, sugerindo a ocorrência de acomodações da estrutura impressa formada, resultando na retomada do aumento do valor de tensão após a acomodação.

O aumento da densidade de enchimento tende a aumentar o limite de escoamento e resistência de forma pouco significativa até a densidade de preenchimento até 70%, contudo, para a densidade de 100% significativas melhoras de resistência à tração e estabilidade da curva tensão x deformação foram observadas.

O perfil de preenchimento octeto se mostrou qualitativamente mais estável em densidades diferentes de 100%, na densidade de 100% os menores limites de resistência obtidos foram para o perfil linha, $12,83 \pm 0,52$ MPa e maiores limites de resistência, no perfil triangular com $26,36 \pm 0,45$ MPa. O perfil octeto apresentou valores intermediários de limite de resistência e menor desvio padrão, com $21,96 \pm 0,26$ MPa.

A impressão com densidades de preenchimento de 100% pode ser viável na produção de peças em substituição à usinadas, a ser avaliada a resistência mecânica requerida, uma vez que a condição impressa apresentou limites de resistência superiores a 50% das obtidas na amostra usinada quando os perfis octeto e triangular foram utilizados.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Comparação entre nylon 6 e nylon 12.
- Análise da influência da variação da velocidade, temperatura e altura de camadas nos parâmetros de impressão, na resistência à tração do nylon 6 com a porcentagem de preenchimento em 100%.

REFERÊNCIAS

- 3DLAB. **Afinal o que é um arquivo STL?**, 2019. Disponível em: <https://3dlab.com.br/afinal-o-que-e-um-arquivo-stl>. Acesso em: 04/05/2024 .
- 3DLAB. **O que é impressão 3D? Conheça a tecnologia de impressoras 3D!**, 2023. Disponível em: <https://3dlab.com.br/tag/tipos-de-preenchimento>. Acesso em: 04/05/2024 .
- ABREU, S. A. C. **Impressão 3D baixo custo versus impressão em equipamentos de elevado custo**. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Porto, 2015.
- AGOSTON, M. K. **Computer Graphics and Geometric Modeling**. 1. ed. [S.l.]: Springer, 2005.
- ALVES, P. H. T. F. Influência do padrão e densidade de preenchimento na resistência mecânica de amostras fabricadas em petg via deposição de material fundido. **UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP -ESCOLA DE MINAS -DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**, p. 1–82, 2021.
- CALLISTER, D. G. R. W. D. **Materials science and engineering: an introduction**. 9. ed. [S.l.]: wiley, 2018.
- C.S.GÓES, I. S. W. A. L. Engenharia assistida por computador cad-cae: Implementação na grade curricular de curso de engenharia no brasil. **Proceeding Series of the Brazilian Society of Applied and Computational Mathematics**, p. 1–6, 2013.
- DUTRA, M. de F. **ANÁLISE DOS RESULTADOS DE ENSAIOS MECÂNICOS EM PRODUTOS OBTIDOS POR MANUFATURA ADITIVA UTILIZANDO FDM: uma revisão sistemática**. Dissertação (Mestrado) — INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS – CAMPUS BETIM, 2021.
- GROOVE, M. P. **Introdução aos processos de fabricação**. 1. ed. [S.l.]: Editora Gen- LTC, 2014.
- JOHNSON, D. The next revolution in industrial manufacturing: New research from ups and the consumer technology association (cta). **CONSUMER TECHNOLOGY ASSOCIATION (CTA)**, p. 1–10, 2018.
- LADCHUMANANDASIVAM, R. **CIÊNCIA DOS POLÍMEROS E ENGENHARIA DAS FIBRAS I**. Natal-Rio Grande do Norte: Universidade do Rio Grande do Norte, 2015.
- LISBOA, J. A. da Cruz; Gracielly Yukari Taniguchi Watanabe; Giovanna Mira Ananias; Ícaro José de Araújo Silva; Maria Fernanda Crisostomo dos S. E. F. K. A. M. V. Poliamida como material de engenharia para aplicações avançadas. **OPEN SCIENCE RESEARCH VIII**, 2022.
- LUZ, L. M. dos S. D. S. G. M. R. M. L. C. M. P. Tipos de polímeros utilizados como materia prima no método de manufatura aditiva por fdm: Uma abordagem conceitual. **Revista científica Universitas**, p. 156–171, 2019.
- MACHADO, D. A. A. **Desenvolvimento de impressora 3D para caracterização dos efeitos de parâmetros de impressão nas propriedades mecânicas do PEEK**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Lisboa, 2019.
- MANO, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia**. 2. ed. [S.l.]: Editora Edgard Blucher LTDA, 1991.

MARTINS, S. de O. **ESTUDO COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE POLÍMEROS DE IMPRESSÃO 3D E DE PLÁSTICOS DE ENGENHARIA UTILIZADOS EM INDÚSTRIAS**. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMIÁRIDO - UFERSA, 2018.

NOGUEIRA, T. N. P. C. C. Estudo comparativo das principais tecnologias de impressão 3d no brasil. **JNT-FACIT BUSINESS AND TECHNOLOGY JOURNAL**, p. 193–212, 2021.

PLASTIREAL IND E COM. DE PLÁSTICOS LTDA. **ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS - NYLON 6 / NYLON 6.6**. São Paulo, 2023.

PLMX. **Guia prático sobre software CAM: o que é, como funciona e os benefícios., 2021**. Disponível em: <https://plmx.com.br/software-cam/>. Acesso em: 25/04/2024 .

QURESHI, K. G. M. C. M. A. J. Strength to cost ratio analysis of fdm nylon 12 3d printed parts. **SME North American Manufacturing Research Conference**, p. 753–762, 2018.

SIEBEN, M. B. C. B. P. G. Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3d. **Revista eletrônica dos cursos de engenharia da faculdade OPET**, p. 9–18, 2017.

SILVA, M. F. da. **RELAÇÃO DOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO COM PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS POLIMÉRICAS OBTIDAS POR IMPRESSÃO 3D PELA TÉCNICA FDM**. TCC — Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2022.

STUCKER, I. G. D. R. B. **Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing**. 2. ed. USA: Springer, 2015.

TRAJANO, V. S. **Comportamento mecânico do Nylon 11 em diferentes temperaturas**. TCC — Universidade Federal Fluminense, 2016.