

# ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO 3D NO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE PEÇAS FABRICADAS COM MATERIAIS POLIMÉRICOS UTILIZANDO O PROCESSO FDM (*FUSED DEPOSITION MODELING*)

Thomas Danton Almeida Silva, [thomas.danton@edu.pucrs.br](mailto:thomas.danton@edu.pucrs.br)

Orientador: Eleani Maria da Costa

**Resumo.** *O processo de fabricação por deposição de material fundido, conhecido como FDM-Fused Deposition Modeling na sigla em inglês, está ganhando destaque no cenário tecnológico através das impressoras 3D, devido à sua versatilidade e eficiência na produção de protótipos. Suas principais vantagens incluem agilidade e custo relativamente baixo associados à fabricação de peças e protótipos. No entanto, a aplicação plena desses métodos é restrita devido à complexidade técnica na previsão do comportamento mecânico dos componentes produzidos devido ao processo de fabricação em camadas. Nesse contexto, este estudo propõe estudar a influência dos parâmetros de impressão analisando o comportamento mecânico dos polímeros PLA comum e PLA com de fibras de carbono. Os parâmetros de impressão variados foram o número de camadas, a orientação e a velocidade de impressão. As propriedades mecânicas foram avaliadas por ensaios mecânicos de resistência a tração e medidas de dureza Shore. Os resultados mostraram que a adição de fibra de carbono no filamento altera os resultados dos testes de tração, mostrando uma superioridade em comparação com o PLA comum particularmente na ductilidade, sendo que a dureza se mantém em valores próximos. Em geral, para a maioria dos parâmetros de impressão, o PLA apresentou comportamento frágil caracterizado por uma ruptura em tração com pouca deformação plástica antes da falha. Em presença das fibras de carbono a aparência da superfície de fratura tornou-se mais rugosa, característica da fratura dúctil, devido à interação entre a matriz e as fibras. A variação de todos os parâmetros teve influência significativa na resistência a tração e na deformação até a ruptura de ambos os materiais, sendo que a orientação foi o parâmetro de maior influência.*

**Palavras-chave:** *Manufatura Aditiva. Resistência Mecânica. PLA. Fibras de Carbono.*

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de fabricação por impressão 3D, conhecido como manufatura aditiva, é um método revolucionário de produção de peças tridimensionais desenvolvidas em softwares de modelagem CAD. Este processo permite a criação de peças por meio da sobreposição de camadas sucessivas de material fundido. Sua história se inicia na década de 1980, quando o engenheiro Chuck Hull desenvolveu a primeira impressora 3D funcional no estado da Califórnia (EUA) 1984, empregando a tecnologia de estereolitografia para criar a primeira máquina que solidificava resinas por meio de lâmpadas. Este marco histórico marcou o início da era da impressão 3D. No entanto, foi somente em 1989 que a tecnologia começou a ganhar reconhecimento comercial, com o desenvolvimento dos primeiros protótipos de impressoras de deposição por fusão, sob a liderança de S. Scott Crump, co-fundador da Stratasys, Ltd.

Ao longo dos anos, a impressão 3D evoluiu significativamente, tornando-se mais acessível financeiramente podendo assim entrar em diversos nichos de mercado. Nos dias de hoje, as impressoras 3D são utilizadas em diversos setores industriais como: ourivesaria, aeroespacial, automobilística e médica. Devido aos avanços desta tecnologia, a impressão 3D possibilita a fabricação de uma vasta gama de produtos, desde próteses até órgãos vitais humanos, transformando significativamente o panorama da medicina.

O processo por deposição de material fundido de impressão 3D, conhecido como FDM-*Fused Deposition Modeling* na sigla em inglês, possibilita inúmeras soluções vantajosas em relação aos métodos de fabricação tradicionais, principalmente quando comparada aos processos de usinagem e injeção de plástico, sendo possível devido à capacidade dessas máquinas de produzir geometrias complexas sem a necessidade de moldes, devido ao processo de deposição camada a camada.

O processo de fabricação aditiva pode resultar em componentes com estruturas internas complexas e anisotrópicas, dificultando a modelagem precisa do comportamento mecânico. A qualidade da impressão, incluindo parâmetros como resolução de camada, tipo de preenchimento, direção de preenchimento e largura de parede, são parâmetros que influenciam significativamente na resistência mecânica. A geometria complexa das peças aumenta a dificuldade da modelagem por elementos finitos pois a falta de dados experimentais confiáveis sobre o comportamento mecânico representa um desafio para a validação dos modelos, tornando necessário o uso de abordagens avançadas de modelagem e simulação para garantir uma análise precisa.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um estudo do comportamento mecânico de peças poliméricas, obtidas por meio da impressão 3D, em face da variação dos parâmetros de impressão. Para tal, dois tipos de materiais foram utilizados: o PLA comum e o PLA reforçado com fibra de carbono. Os objetivos específicos deste trabalho consistiram em imprimir peças em configurações geométricas específicas com os materiais poliméricos PLA e PLA com fibras de carbono, empregando a técnica de impressão 3D de FDM (filamento) e aplicando diferentes parâmetros de impressão tais como orientação e espessura das camadas, bem como velocidade de impressão. As propriedades mecânicas das peças impressas foram avaliadas por meio de ensaios de tração e dureza Shore.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Fundamentos da Impressão 3D

A impressão 3D é uma tecnologia que cria objetos físicos a partir de modelos digitais, utilizando um processo de manufatura aditiva, no qual a matéria-prima é adicionada em camadas até formar o objeto final. Além disso, a impressão 3D oferece diversas vantagens à indústria, permitindo uma rápida prototipagem que antes exigia modelagem manual e produção de matrizes. Isso não apenas acelera o processo de desenvolvimento de produtos, mas também reduz os custos associados à fabricação de protótipos (Jandyal, 2022; Karakurt e Li, 2020; Shahrubudin, 2019; Morandini, 2020).

Os métodos convencionais de fabricação de protótipos costumam ser demorados e caros. Em contrapartida, a impressão 3D se destaca como uma solução eficiente para prototipagem rápida, permitindo a criação de protótipos em um único passo e em menos tempo. A prototipagem rápida engloba tecnologias que convertem projetos digitais em modelos físicos por meio de softwares CAD (*Computer Aided Design*), agilizando a transição do conceito à realidade (Garcia, 2010).

De acordo com Lonjon (2017), a impressão 3D teve seu início no ano 1980, época na qual o precursor japonês Hideo Kodama, médico e professor do Instituto Municipal de Pesquisa Industrial de Nagoya, solicitou uma patente para um novo tipo de tecnologia de prototipagem rápida. Este seria o marco de uma nova era no surgimento da manufatura aditiva, a qual revolucionária diversos setores industriais. A invenção de Kodama provocou uma alteração significativa nas regras do processo de fabricação, ao possibilitar a fabricação de modelos físicos a partir de dados digitais, sem molde ou ferramenta. Esta primeira inovação abriu o caminho para a evolução da impressão 3D, de uma máquina experimental para uma tecnologia de ponta.

Por meio da impressão 3D, é viável criar peças com complexidade geométrica quase ilimitada, o que abre novas possibilidades em campos como engenharia e medicina. Essa tecnologia tem o potencial de transformar indústrias inteiras, possibilitando a produção de componentes que seriam impossíveis de serem fabricados com métodos tradicionais. Além disso, a impressão 3D é mais sustentável, já que gera menos desperdício de material e permite a utilização de materiais reciclados. Em suma, a impressão 3D não só revoluciona a maneira como produtos são criados, mas também molda o futuro da fabricação.

Nas palavras de Mello (2017, p. 18), a atuação desta tecnologia é tão vasta que já se encontra em “objetos fabricados com destino a educação, passando por peças para o setor automotivo e aeroespacial, até a atuação na área da saúde, revolucionando o atual mundo de diagnósticos e cirurgias, reproduzindo designs simples ou complexos e arrojados”.

A integração da manufatura aditiva com outras tecnologias da Indústria 4.0 amplia ainda mais suas possibilidades. Esta quarta Revolução Industrial se destaca pela implementação de processos automatizados e inteligentes, o que complementa a natureza inovadora da impressão 3D. Avanços recentes incluem a utilização de materiais mais resistentes e aprimoramentos nos processos de impressão, aumentando a eficiência e a qualidade dos produtos.

Em termos de custo, a manufatura aditiva tem se tornado cada vez mais acessível, especialmente para pequenas e médias empresas. A redução dos preços dos equipamentos de impressão 3D e a disponibilidade de uma variedade maior de materiais contribuem para tornar essa tecnologia mais viável economicamente. Além disso, a capacidade de produzir peças complexas e sob medida sem desperdício de insumos é um fator importante na economia global de recursos.

### 2.2.1. Processo de Fabricação 3D

De acordo com (Lira, 2021), o processo de produção de uma peça 3D é dividido em cinco fases: (1) A elaboração do modelo tridimensional em um software CAD; (2) A conversão de formato sólido para modelo de malha “STL”; (3) Fatiamento em diversas camadas de seção transversal; (4) Fabricação da peça na impressora; e (5) Acabamento e limpeza.

### 2.2.2. Modelagem CAD

Há diversos *softwares* de desenvolvimento de modelos geométricos 3D no mercado atual como (SolidWorks, Inventor e CREO) que possibilitam a confecção de modelos ou projetos de grande complexidade, empregando operações com sólidos ou superfícies. A abordagem de moldagem sólida emerge como a mais prática, sem enfrentar desafios significativos ao importar para formatos utilizados na manufatura aditiva (Volpato et al., 2018).

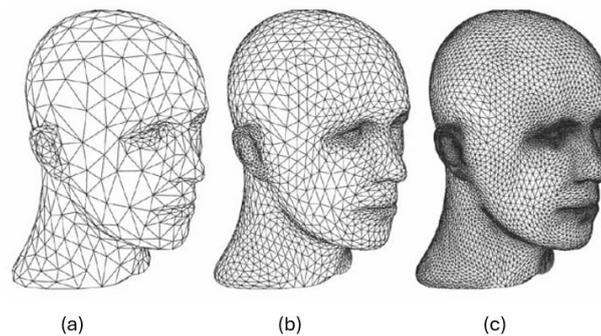
A distinção entre o ambiente 2D e o 3D reside na adição do eixo Z, aproveitando o mesmo conjunto de comandos para desenhar tanto em duas dimensões quanto em três. Os modelos tridimensionais oferecem a vantagem de serem observados a partir de qualquer perspectiva, possibilitando a criação digital de objetos para fins de cálculos, análises, representação 2D e apresentações animadas.

### 2.2.3. Conversão de sólido para malha

Em 1988, o formato STL (*Stereolithography Tessellation Language*) foi criado pelo Albert Consulting Group, atendendo a uma demanda da 3D Systems Inc. (Volpato, 2018). Ele surgiu como uma alternativa prática e confiável para representar objetos tridimensionais, usando uma malha de triângulos que cobre todas as superfícies do modelo. Cada um desses triângulos é composto por três vértices e um vetor normal unitário que aponta para fora da peça, identificando as áreas desprovidas de material. Essa estrutura permite que os softwares de fatiamento tratem o modelo como uma superfície única, facilitando o processo de divisão em camadas para a impressão 3D.

O formato STL se estabeleceu como o principal formato na indústria de manufatura aditiva (MA) e é amplamente compatível com quase todos os softwares CAD 3D. A precisão do arquivo STL é proporcional a quantidade de triângulos usados na composição da malha: quanto mais triângulos, maior o nível de detalhe, entretanto, isso também resulta em arquivos maiores. Para ajustar esse equilíbrio entre a precisão do modelo. A Figura 1 ilustra os níveis de precisão possíveis de malha.

**Figura 1.** Níveis de precisão de malha: (a) Baixa Precisão, (b) Média Precisão e (c) Alta Precisão (3D, Lab, 2024)



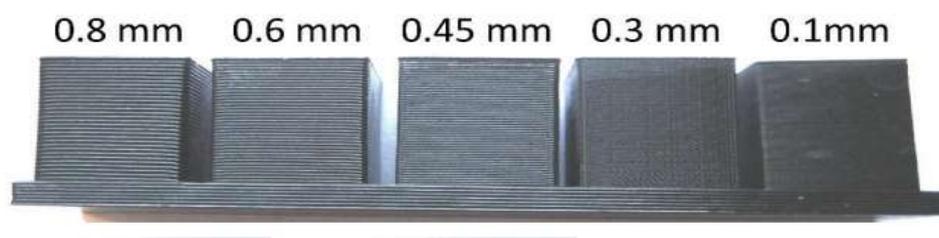
#### 2.2.4. Processo de fatiamento e pré-processamento.

Após a conversão do arquivo para o formato STL, o software de pré-processamento realiza o fatiamento do modelo, segmentando-o em diversas camadas. Este processo é fundamental, pois as informações resultantes são utilizadas para traçar a trajetória do extrusor, que é a parte mecânica responsável por aquecer e depositar o material, permitindo a formação de cada camada individualmente (Azevedo, 2013; Lino, 2014).

Entre os softwares de fatiamento mais reconhecidos no mercado estão o Cura, que se destaca pela sua interface intuitiva; o PrusaSlicer, conhecido por suas funcionalidades avançadas; e o Simplify3D, apreciado por sua flexibilidade e capacidade de otimização.

A quantidade de camadas resultantes do fatiamento tem uma influência significativa na resolução do modelo impresso. Altura de camadas menores proporcionam um acabamento mais suave e detalhado, embora proporcione um aumento considerável no tempo de impressão. Entretanto, camadas mais espessas reduzem o tempo necessário para a impressão e podem comprometer a qualidade estética e a precisão do modelo final. A escolha do número de camadas deve considerar um equilíbrio entre a qualidade desejada e a eficiência do processo de impressão (Trott, 2012; Popescu 2018). A Figura 2 mostra um comparativo de peças com diferentes alturas de camadas.

**Figura 2.** Comparativo de peças com diferentes espessuras de camada (Fabmanager, 2022)



#### 2.2.5. Fabricação do modelo 3D

A partir da técnica escolhida, seja ela fusão, deposição ou sinterização, entre outras opções, a máquina constrói o objeto camada por camada, utilizando matéria prima que pode ser proveniente de polímeros, metais em pó ou resinas líquidas. As camadas são construídas de acordo com as especificações do arquivo digital, muitas dessas máquinas operam de forma altamente automatizada, exigindo pouca ou nenhuma interferência direta de um operador, já que os parâmetros de impressão e o controle do processo são definidos previamente. Isso permite uma produção mais eficiente e segura, minimizando erros humanos e otimizando o tempo de execução (Hotza, 2009).

### 2.2.6. Limpeza

A última etapa, o pós-processamento, inicia-se com a remoção cuidadosa do objeto da máquina. Alguns materiais, como resinas, necessitam de cura por meio de luz UV ou calor para garantir suas propriedades mecânicas adequadas. Outros itens passam por uma limpeza detalhada para remover resíduos de suporte ou pó, seguida por etapas adicionais, como lixamento para suavizar a superfície, polimento para dar brilho ou, ainda, aplicação de acabamentos como pintura ou revestimentos protetores que aumentam a durabilidade e melhoram a aparência final. Dependendo da aplicação, também pode ser realizada a montagem de componentes, ajustes de tolerâncias ou testes funcionais para garantir que o produto atenda às especificações desejadas (Volpato, 2018).

## 2.3. Aplicações da Impressão 3D na Indústria

### 2.3.1. Indústria Aeroespacial

A impressão 3D revolucionou a liberdade de design na fabricação de componentes, especialmente na indústria aeroespacial. Essa tecnologia permite a produção de peças mais leves e com geometrias complexas, o que contribui para a redução do consumo de energia e de recursos. Um exemplo notável é a possibilidade de projetar peças na Terra e enviá-las digitalmente para a Estação Espacial Internacional, onde podem ser impressas no espaço. Essa abordagem não apenas diminui os custos de transporte, mas também acelera os processos de manutenção e reparo (Carneiro, 2019).

Além disso, a impressão 3D pode gerar economia de combustível ao reduzir a quantidade de material necessária para fabricar as peças aeroespaciais. Ela é amplamente utilizada para criar peças de reposição para componentes críticos, como motores, que tendem a sofrer danos e precisam ser substituídos com frequência (Shahrubudin, Chuan, & Ramlan, 2019).

**Figura 3.** Primeira peça de metal feita inteiramente no espaço (TecMundo, 2024)



### 2.3.2. Indústria Automotiva

A BMW anunciou a utilização da impressão 3D para produzir componentes personalizados no interior de seus veículos de luxo. Essa tecnologia está sendo empregada para aumentar a eficiência da produção e reduzir custos, permitindo maior flexibilidade no design e personalização dos acabamentos internos. O uso de impressão 3D possibilita à BMW atender às demandas específicas dos clientes, enquanto otimiza o tempo de desenvolvimento de novos modelos (Topcar, 2020).

Por outro lado, a Volkswagen, em parceria com a HP, está utilizando a tecnologia de impressão 3D Multi Jet Fusion para produzir peças metálicas, como suportes e componentes estruturais. Essa abordagem permite a fabricação de peças até 50% mais leves do que as tradicionais, contribuindo para a melhoria do desempenho dos veículos e para a redução de emissões (Carneiro, 2019).

### 2.3.3. Indústria de Calçados

Os filamentos flexíveis como TPU e TPE permitem a criação de calçados personalizados via impressão 3D, promovendo maior satisfação do cliente e produção sustentável ao evitar desperdícios e reduzir emissões por meio da manufatura localizada (Monezi & Okada, 2021). Além disso, essa tecnologia também é usada para fabricar suportes personalizados para exposição de calçados em lojas, com designs únicos que melhoram a apresentação dos produtos, oferecendo resistência, leveza e custo-benefício (Rosa, 2018).

### 2.3.4. Indústria Médica

A impressão tem sido uma poderosa ferramenta para medicina moderna, permitindo uma produção sob medida de próteses e implantes apropriados para a anatomia de cada paciente. Uma produção sob medida traz não apenas conforto e otimismo quanto a uma recuperação mais rápida, mas também um aprimoramento na precisão de cirurgias complexas. Os cirurgiões podem utilizar modelos de impressão tridimensional para planejar a operação, reduzindo riscos, melhorando resultados e diminuindo o tempo da operação (Cardoso, Tavares, & Magnagnagno, 2021).

Além disso, o desenvolvimento da bio-impressão de tecidos possibilita a impressão de tecidos humanos tais como pele e cartilagem, no intuito de tratar queimaduras e feridas. A tecnologia está, também, a serviço do ensino médico, por meio do fornecimento de modelos anatômicos mais detalhados que permitem estudos práticos, viabilizando a fabricação local e sob demanda de equipamentos médicos (Oliveira, et al., 2017).

### 2.3.5. Arquitetura e Construção Civil

A impressão 3D demonstrou uma inovação significativa no setor de arquitetura e da construção civil, trazendo ganhos com a redução de custos, com aumento da eficiência e com maior liberdade do projeto. Essa tecnologia permite a criação de detalhes arquitetônicos com melhor visualização, proporcionando a visualização de projetos complexos, antes mesmo de sua construção (Florêncio, 2019).

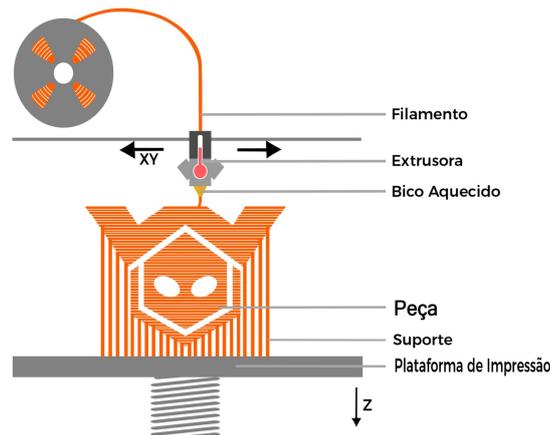
Dentro do setor da construção civil, a impressão 3D também está alterando a concepção de construção dos edifícios. Ao utilizar os materiais concretos, argamassa e polímeros, as estruturas ou partes dos edifícios podem ser impressas diretamente no terreno da obra, reduzindo significativamente o prazo de execução e o desperdício de materiais. Essa técnica ainda colabora para uma construção mais sustentável, por permitir a utilização de materiais recicláveis e fazer o melhor uso dos recursos (Green, 2024).

## 2.4. Técnicas de Impressão 3D

As principais técnicas de impressão 3D são descritas a seguir, sendo elas: Modelagem por Fusão e Deposição (FDM), Estereolitografia (SLA), Sinterização Seletiva a Laser (SLS), Manufatura de Objetos Laminados (LOM), Binder Jetting, Material Jetting e Directed Energy Deposition (DED).

### 2.4.1. Modelagem por Fusão e Deposição (FDM)

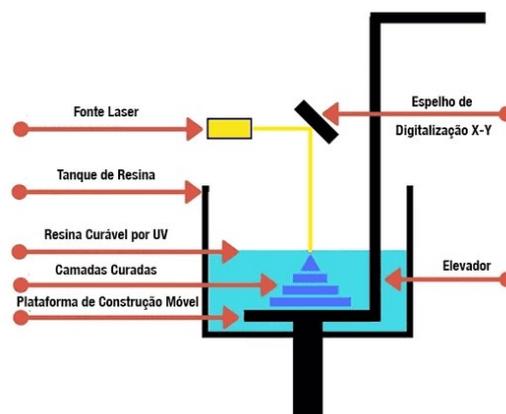
O processo de fabricação FDM teve seu início no final da década de 1980, por Scott Crump, co-fundador da Stratasys. Em 1988, Crump desenvolveu o primeiro protótipo de uma impressora FDM, usando materiais simples como uma pistola de cola quente e plástico (Embrapii, 2023). O filamento termoplástico é alimentado em um bico aquecido (*hotend*). O bico amolece o filamento e deposita o material camada por camada sobre uma plataforma aquecida para evitar o descolamento da camada, solidificando quase instantaneamente após ser extrudado com auxílio de ventilação forçada gerada por um pequeno ventilador (Volpato, 2018; Hotza, 2009). A Figura 4 ilustra o processo FMD.

**Figura 4.** Processo de fabricação FDM (WishBox, 2019)

A Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) é reconhecida como uma das tecnologias de impressão 3D mais requeridas, dado o seu uso diversificado e utilização diversificada em diversos setores da indústria. A possibilidade de utilizar uma grande gama de polímeros, torna o processo ideal para o uso em diversas indústrias que procuram por soluções de protótipo e fabricação de peças funcionais. Os principais materiais que podem ser utilizados são: PLA (Ácido Polilático): Material biodegradável, ideal para prototipagem rápida e modelos de visualização, ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno): Conhecido por sua durabilidade e resistência a impactos, é amplamente usado em protótipos funcionais, PETG (Polietileno Tereftalato Glicol): Combina a facilidade de impressão do PLA com a resistência do ABS, sendo ideal para peças mecânicas, TPU (Poliuretano Termoplástico): Material flexível, usado para aplicações que exigem elasticidade. Estes materiais são comercializados em forma de filamentos enrolados em carretéis com diâmetros que variam entre 1,75mm e 2,75mm (Volpato, 2007; Gonzalez 2016).

#### 2.4.2. Estereolitografia (SLA)

A tecnologia de Estereolitografia (SLA) foi inventada em 1983 por Chuck Hull, cofundador da empresa 3D Systems. Hull desenvolveu a técnica, ilustrada na Figura 5, como uma solução para criar protótipos rápidos diretamente a partir de um modelo digital. Em 1986, ele registrou a patente da tecnologia, marcando o início da impressão 3D comercial. A SLA se tornou a primeira tecnologia de manufatura aditiva a ser amplamente adotada, permitindo às indústrias desenvolver protótipos e peças com um nível de detalhe que até então era impossível de alcançar com métodos tradicionais (Takagaki, 2012).

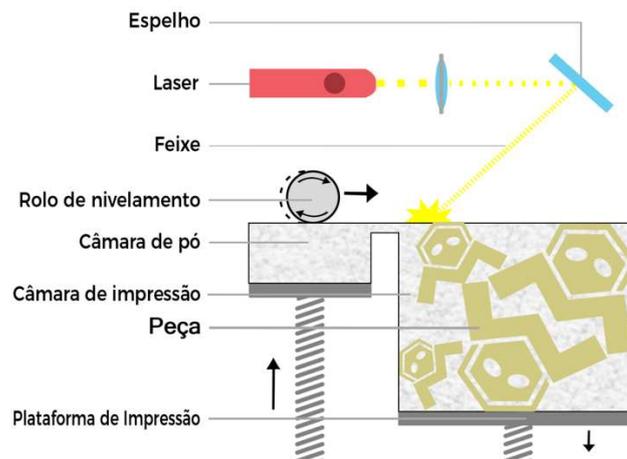
**Figura 5.** Tecnologia de estereolitografia SLA (LWT Sistemas, 2024)

Após a primeira camada ser finalizada, a plataforma desce parcialmente para que mais resina seja colocada sobre a superfície, e assim o ciclo se repete até a peça ser finalizada. Estruturas de suporte são modeladas automaticamente para abranger características complexas e precisam ser removidas após a impressão, antes que o modelo passe por cura UV para aumentar a resistência. Esta tecnologia tem ganhado muito espaço na área médica, porque ela pode ser aplicada em medicina, odontologia, joalheria ou prototipagem industrial, onde peças intrincadas precisam ser fabricadas utilizando uma variedade de resinas especializadas ou rígidas e flexíveis biocompatíveis (Hotza, 2009; Monteiro, 2015).

### 2.4.3. Sinterização Seletiva a Laser (SLS)

A Sinterização Seletiva a Laser (SLS) mostrada na Figura 6 é uma das técnicas de manufatura aditiva mais sofisticadas, utilizada largamente na indústria para fabricar componentes de qualidade e com geometrias de alta complexidade. As bases desta tecnologia foram lançadas nos anos 80 sob a orientação de Carl Deckard, na época estudante da Universidade do Texas, em Austin, e sob a supervisão do professor. O trabalho de pesquisa de Deckard levou, em 1986, à construção do primeiro protótipo funcional de uma máquina SLS, sendo a patente concedida em 1989 (Engineering, 2020: Ams, 2020).

**Figura 6.** Sinterização Seletiva a Laser (SLS) (WishBox, 2019)



O SLS é um processo de fusão de partículas de pó através de feixe de laser de alta potência. A tecnologia possibilita a construção de peças tridimensionais camada por camada, mediante a sinterização (fusão parcial) do pó proporcional ao calor gerado pelo laser, resultando numa estrutura sólida. Permitindo a produção de peças de alta precisão com materiais que vão desde polímeros até metais. A tecnologia SLS é extremamente versátil em termos de materiais. Entre os mais comuns estão: Nylon (PA12, PA11): Polímeros duráveis e resistentes. TPU (Poliuretano Termoplástico): Oferece flexibilidade e elasticidade. Alumínio e Aço Inoxidável: Metais populares para aplicações que exigem alta resistência mecânica e térmica. Pós de Cerâmica: Usados em aplicações que exigem alta resistência ao calor e abrasão (Hotza, 2009; Monteiro, 2015; Rapiddirect, 2022)

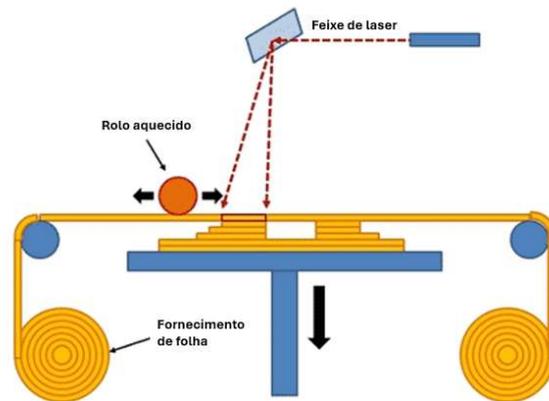
### 2.4.4. Manufatura de Objetos Laminados (LOM)

A tecnologia de Manufatura de Objetos Laminados (LOM) foi desenvolvida no final dos anos 1980 pela empresa Helisys Inc., fundada por Michael Feygin. A LOM foi projetada para ser uma alternativa econômica às tecnologias de manufatura aditiva tradicionais, como a Estereolitografia (SLA) e a Sinterização Seletiva a Laser (SLS).

A Manufatura de Objetos Laminados (LOM) é um processo de fabricação que constrói peças

tridimensionais através da laminação de camadas de material que são coladas e recortadas em forma de um modelo CAD (Computer-Aided Design). Um laser focado corta a primeira camada do material de acordo com os contornos da geometria requerida. Em seguida, uma nova camada de material na forma de folhas finas é aplicada sobre a camada anterior. Este procedimento, mostrado na Figura 7, é realizado lote por lote, onde cada nova folha é anexada e recortada nas formas dadas pelo modelo 3D. Quando todas as camadas estão empilhadas e cortadas, as camadas são pressionadas pela máquina para que possam ser fundidas em uma única forma sólida (Lipson; Kurman, 2013; 3DLab, 2018). Embora esta tecnologia não seja tão popular quanto outras tecnologias de manufatura aditiva, ela possui diversas aplicações em setores específicos, especialmente devido ao seu custo relativamente baixo e capacidade de produzir peças de grande escala.

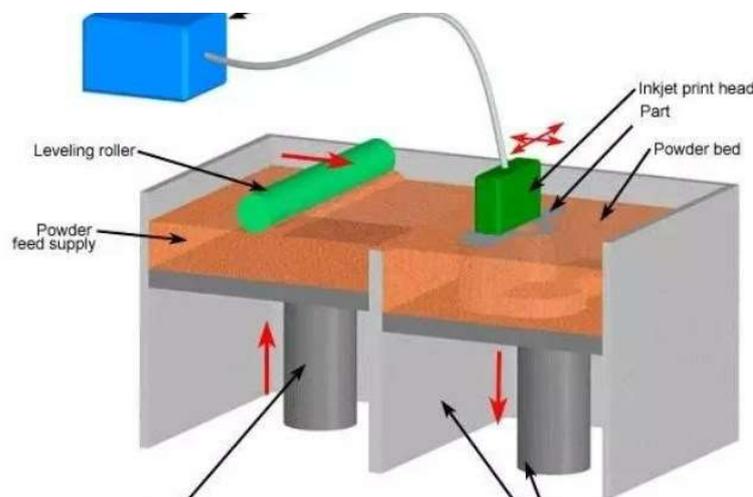
**Figura 7.** Manufatura de Objetos Laminados (LOM) (Berlandi, 2021)



#### 2.4.5. Binder Jetting (BJ)

A tecnologia de Binder Jetting (Figura 8) foi desenvolvida no início dos anos 1990 no Massachusetts Institute of Technology (MIT), com o objetivo de criar uma técnica de impressão tridimensional mais rápida e econômica em comparação com outras tecnologias de manufatura aditiva (Hotza, 2009; Monteiro, 2015). O Binder Jetting utiliza aglutinante líquido para unir camadas de pó, formando peças tridimensionais. O processo envolve a deposição do aglutinante sobre o pó, camada por camada, seguida de pós-processamento, como cura ou sinterização, para solidificar a peça. Se utilizam diversos materiais como: metais, cerâmicas, plásticos, esta tecnologia é amplamente utilizada em áreas como automotiva e aeroespacial devido à sua eficiência, flexibilidade e capacidade de produzir peças de grande porte (Ziaee & Crane, 2019).

**Figura 8.** Tecnologia de *Binder Jetting* (BJ) (Findtop, 2024)

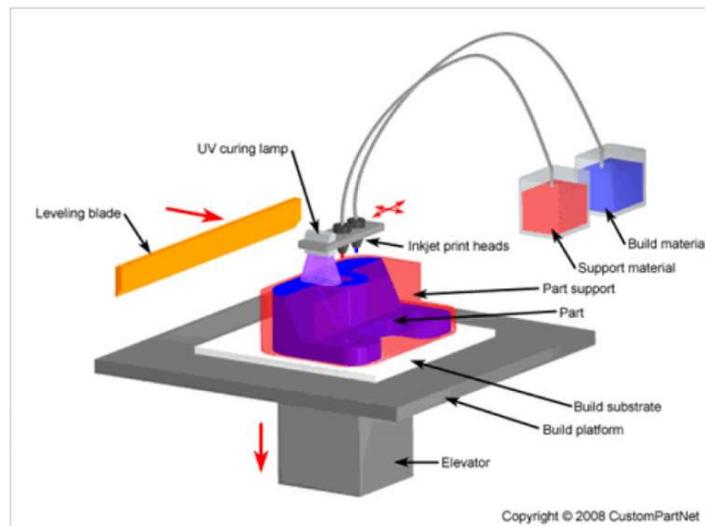


#### 2.4.6. Material Jetting (MJ)

A tecnologia de injeção de materiais foi desenvolvida no início da década de 1990 pela Objet Geometry (agora parte da Stratasys). Esta tecnologia surgiu como uma nova forma de elevar o nível da precisão dimensional e as limitações técnicas de outras tecnologias de impressão 3D da época, como FDM e SLA. Desde então, a moldagem por injeção tornou-se popular e é uma das soluções mais utilizadas para a produção de protótipos detalhados possibilitando a impressão de diferentes materiais em uma mesma peça (Gibson et al., 2010).

O Material Jetting funciona depositando material no estado líquido, camada por camada, sobre a plataforma de construção, semelhante a uma impressora jato de tinta. Cada camada é solidificada pela radiação ultravioleta (UV), entretanto o método de cura pode variar dependendo do material utilizado. O processo é repetido até que a peça seja formada, com a plataforma de construção descendo gradualmente após cada camada para permitir a deposição do material. Essa tecnologia é conhecida pela alta precisão e pela capacidade de produzir peças com excelente acabamento superficial, sendo amplamente utilizada para prototipagem rápida e na fabricação de modelos detalhados em diversas indústrias (Santos, 2018).

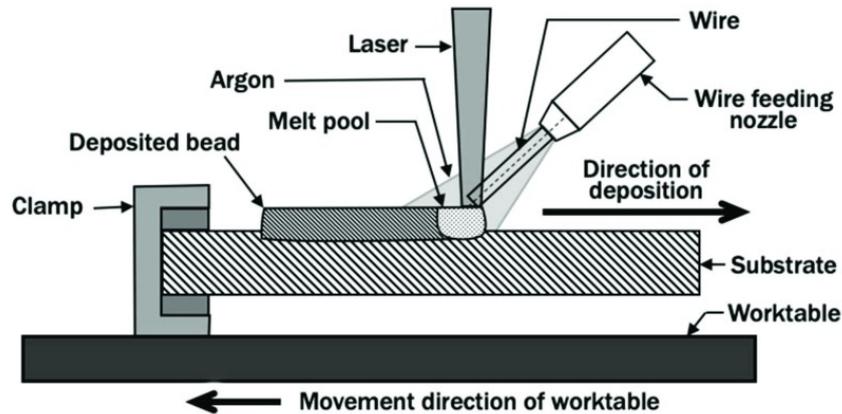
**Figura 9.** Tecnologia de *Material Jetting* (MJ) (Magalhães, 2024)



#### 2.4.7. Directed Energy Deposition (DED)

Desenvolvido na década de 1990 como uma solução para fabricar peças metálicas altamente complexas e reparar componentes existentes avariados, principalmente no setor aeroespacial e de defesa. O processo de Deposição de Energia Direcionada (*Directed Energy Deposition*-DED) derivou de processos como soldagem a laser e projeção térmica por projeção de partículas, e tornou-se uma das técnicas mais proeminentes de produção de aditivos para metais. A evolução desta tecnologia se deve ao aumento da eficiência fontes de energia melhorando a precisão da técnica (Figueiredo, 2024)

O processo DED utiliza uma fonte de energia concentrada, como laser, feixe de elétrons ou arco elétrico, para fundir o material de deposição, geralmente em forma de pó ou fio, e depositá-lo camada por camada sobre a base de apoio. A fonte de energia aquece e funde o material no ponto de deposição, criando uma camada sólida. O processo é repetido, com o material sendo depositado de maneira precisa (Santos, 2018). Um esquema do processo DED é apresentado na Figura 10.

**Figura 10.** Processo de Deposição de Energia Direcionada (DED) (Researchgate, 2020)

## 2.5. Principais Materiais Poliméricos Utilizados para Impressão 3D

Os materiais poliméricos utilizados na impressão 3D são termoplásticos variados e dependem do tipo de tecnologia de impressão utilizada e da aplicação desejada. Entre os polímeros termoplásticos mais comuns estão o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), o PLA (Poliácido Láctico) e o PET (Polietileno Tereftalato), cujas propriedades são apresentadas nos itens a seguir.

### 2.5.1. ABS

O ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) é um termoplástico mais utilizado na impressão 3D, reconhecido por sua alta resistência ao impacto, rigidez e estabilidade térmica (Celentano 2003; Albuquerque, 2014). Após a impressão diversos métodos de pós-processamento podem ser aplicados, como acabamento com vapor de acetona, que suaviza as linhas de camada; lixamento para refinar a superfície; pintura (Salinas 2014). Além disso, o Imprimir com ABS exige um grau de conhecimento e experiência do usuário, é necessário manter temperaturas altas (230–260°C no bico e 90–110°C na mesa) e utilizar mecanismos de proteção contra rajadas de ar para evitar deformações. Este material é ideal para prototipagem e peças funcionais, oferecendo durabilidade e ótimo acabamento. Na Figura 11 é possível observar o perfil das características com maior relevância encontradas no ABS.

**Figura 11.** Perfil de comportamento do ABS (3dapplications, 2023)

### 2.5.2. PLA

O Poliácido Láctico (PLA) é um dos principais biopolímeros da categoria dos polímeros

biodegradáveis, devido às suas propriedades físicas e mecânicas. O PLA é um poliéster produzido através da polimerização do ácido láctico obtido, principalmente, por fermentação bacteriana de glicose extraída do milho ou da cana de açúcar (Belloli, 2010).

Material tem alta dureza superficial consecutivamente tem alta resistência a abrasão, ideais para peças que sofreram desgastes, ideal peças grandes onde o material ABS pode sofrer descamação por causa de sua proporção, porém que sejam mantidas em locais longe do sol, pelo fato do material não ter boa resistência aos raios UV, sendo considerado o material de fácil impressão. Na Figura 12 é possível observar o perfil das características com maior relevância encontradas no PLA.

**Figura 12.** Perfil de comportamento do PLA (3dapplications, 2023)



### 2.5.3. PET

O plástico PET (Polietileno Tereftalato), frequentemente usado em sua variante modificada PETG, é valorizado na impressão 3D por sua alta resistência mecânica, elasticidade, durabilidade e estabilidade química, sendo ideal para peças funcionais e aplicações em contato com alimentos (Ksawery, Wojciech, Dymitr, 2016). Ele suporta temperaturas de até 80–90°C, possui baixa absorção de umidade e oferece boa transparência, permitindo impressões translúcidas. No pós-processamento, o PETG pode ser lixado, pintado com primers e tintas adequadas, colado com adesivos específicos e polido termicamente para suavizar superfícies. É facilmente imprimível com temperaturas do bico entre 220–250°C e mesa aquecida a 60–80°C. Na Figura 13 é possível observar o perfil das características com maior relevância encontradas no PET.

**Figura 13.** Perfil de comportamento do PET (3dapplications, 2023)



### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

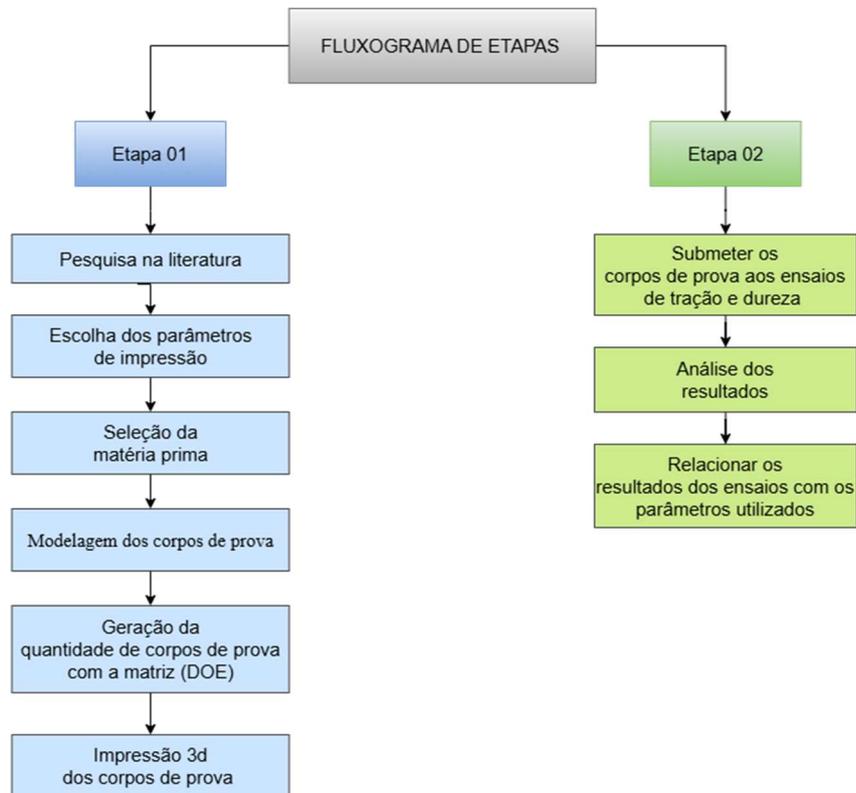
#### 3.1. Metodologia da Pesquisa

A metodologia da pesquisa foi dividida em duas fases distintas visando a análise dos parâmetros de impressão e o comportamento mecânico dos materiais estudados.

Com base na classificação proposta por Gil (2022), este trabalho enquadra-se como uma pesquisa de planejamento experimental, ou delineamento experimental. Tal abordagem caracteriza-se pela identificação e controle de variáveis que influenciam o resultado de um sistema ou processo.

Para atingir os objetivos específicos definidos, foi elaborado um fluxograma detalhado, apresentado na Figura 14, o qual descreve as etapas metodológicas seguidas ao longo do desenvolvimento do estudo.

**Figura 14.** Fluxograma Experimental (Autor, 2024)



Na primeira fase, realizou-se uma revisão de literatura referente a influência dos parâmetros de impressão, processos de manufatura aditiva e principais matérias primas utilizadas. A partir dessas informações, os corpos de prova foram modelados utilizando o software Autodesk Inventor 2024, em conformidade com as normas técnicas atualizadas ASTM D 638 para ensaios de tração e ASTM D 2240 para determinação da dureza Shore D.

Os materiais analisados foram PLA com 15% de insertos de fibra de carbono e PLA comum com a finalidade de avaliar suas propriedades mecânicas em condições específicas de impressão. A quantidade de corpos de prova foi definida com a utilização da matriz de experimentos obtida com método *Design of Experiments* (DOE), que permitiu a geração de configurações otimizadas para os ensaios de tração, considerando as variáveis de entrada.

Para fabricação dos protótipos foi utilizada a impressora Ender 3 V3 SE. Os parâmetros principais previamente selecionados foram: velocidade de impressão, orientação das camadas e a espessura de camada, fatores que exercem maior influência na qualidade e na resistência mecânica das peças (Silva, 2022; Popescu, 2018; Arockiam, 2022).

Na segunda fase, os corpos de prova impressos foram submetidos a ensaios mecânicos de resistência à tração e dureza. Esses testes foram conduzidos com o objetivo de avaliar a influência das diferentes configurações de impressão nas propriedades mecânicas resultantes. Para analisar a morfologia da fratura das superfícies das amostras após ensaio de resistência a tração, utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura (MEV). Essa técnica permitiu obter imagens de alta resolução, revelando detalhes estruturais e topográficos das superfícies, essenciais para compreender os efeitos dos parâmetros de impressão na resistência mecânica.

### 3.2. Impressora 3D FDM

A impressora utilizada neste estudo foi a Ender 3 V3 SE, ilustrada na Figura 15. Segundo fabricante (Creality, 2024), projetada para ser versátil e de fácil utilização, a impressora utiliza filamentos com 1,75 mm de diâmetro e destaca-se por sua precisão, praticidade e adequação a diversas aplicações. Compatível com uma ampla gama de materiais, permite criar desde protótipos funcionais e objetos decorativos com alta qualidade superficial.

**Figura 15.** impressora 3D Ender 3 V3 SE utilizada neste trabalho. (Autor, 2024)



a) Vista frontal



Vista ortogonal

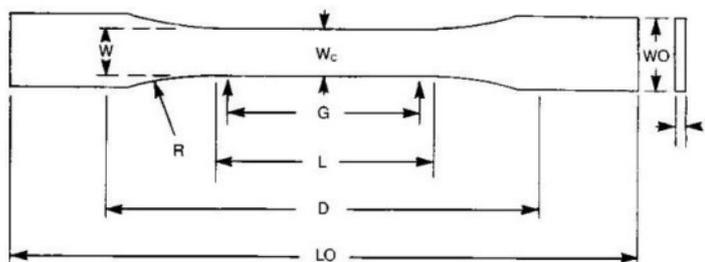
### 3.1. Modelagem e Confeção dos Corpos de Prova

Os corpos de prova foram projetados conforme as normas ASTM D698 (*Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*) e ASTM D2240 (*Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness*), garantindo que atendam aos requisitos necessários para realização dos ensaios de tração e dureza. Foi utilizado o software Autodesk Inventor 2024 para confecção dos modelos tridimensionais. O uso de recursos paramétricos tornou o processo mais dinâmico, permitindo ajustes rápidos nas dimensões e na aplicação de tolerâncias, alinhando os modelos às exigências das normas de forma prática e eficiente.

Especificações técnicas	Dados
Marca	Creality
Modelo	Ender 3 V3 SE
Tipo de tecnologia	FDM
Área de impressão	220 mm x 220 mm x 250 mm
Velocidade de impressão típica	180mm/s
Aceleração	2500m/s
Tipo de placa mãe	Silenciosa de 32 bits
Temperatura máxima do bico	$\leq 260^{\circ}\text{C}$
Temperatura máxima da mesa	$\leq 100^{\circ}\text{C}$
Recuperação de perda de energia	Sim
Materiais utilizados	ABS, PLA, PETG, TPU, etc
Alimentação	100-120V, 200-240V, 50/60Hz 350W
Software fatiador	Creality Print, Cura $\geq$ versão 5.0
Arquivo de transferência	STL, OBJ, AMF, 3MF
Sistemas compatíveis	Windows, Mac, Linux
Conectividade	Cartão SD
Materiais utilizados	PLA, PETG, TPU.
Dimensões do equipamento	349 mm (A) x 365 mm (P) x 490 mm (L)
Peso líquido	7,12 kg
Dimensões da caixa	575 mm (A) x 390 mm (P) x 235 mm (L)
Peso bruto	9,14kg

Para este estudo, o corpo de prova escolhido para o ensaio de resistência à tração foi o modelo “Tipo I” conforme mostra a Figura 16, e as dimensões são apresentadas na Tabela 1.

**Figura 16.** Formato do corpo de prova modelado para o ensaio de resistência à tração (ASTM D698).



**Tabela 1.** Dimensões corpos de prova para ensaios de tração - Tipo I (ASTM D638).

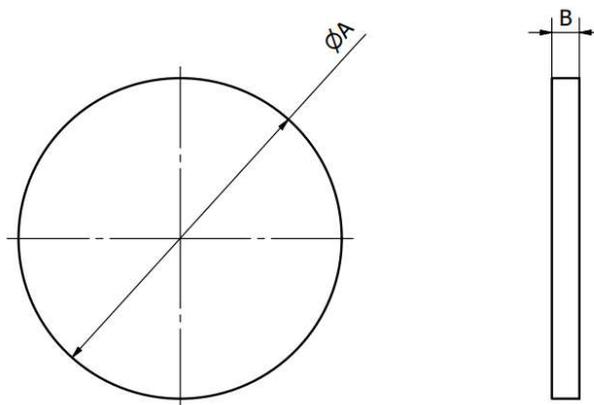
Dimensões	Valor (mm)
W- Largura da Seção Estreita	13,0

L - Comprimento da Seção Estreita	57,0
WO - Largura Total	19,0
LO - Comprimento Total	165,0
G - Comprimento do Calibre/Bitola	50,0
D - Distância Entre as Garras	115,0
R - Raio do Filete	76,0
T - Espessura	3,2

Os ensaios de tração foram realizados nas seguintes condições operacionais: velocidade de ensaio de 5 mm/min e célula de carga de 20 kN. Foram confeccionados 5 corpos de prova para cada condição. No total, foram ensaiados 150 corpos de prova, estes diferenciando em materiais e parâmetros de impressão.

A Figura 17 mostra o corpo de prova escolhido para o ensaio de dureza Shore D e as dimensões são apresentadas na Tabela 2. O procedimento consistiu em realizar seis medições equidistantes a 6 mm em cada amostra. Para cada material analisado, foram utilizadas três amostras, totalizando 18 medições por material. As leituras foram realizadas sob condições controladas, conforme os critérios estabelecidos pela norma.

**Figura 17.** Formato corpo de prova modelado para o ensaio de dureza (ASTM 2240).



**Tabela 2.** Dimensões corpos de prova para ensaios de dureza - (ASTM 2240).

Dimensões	Valor (mm)
A- Diâmetro do disco	70,0
B – Espessura	6,0

### 3.2. Materiais dos Filamentos

Os materiais analisados foram o PLA com 15% em volume de fibra de carbono e PLA comum, visando avaliar suas propriedades mecânicas em condições específicas. A Tabela 3 mostra as propriedades mecânicas disponibilizadas pelos fabricantes.

**Tabela 3.** Propriedades mecânicas fornecidas pelos fabricantes do PLA Carbon Krei comparadas com o PLA comum.

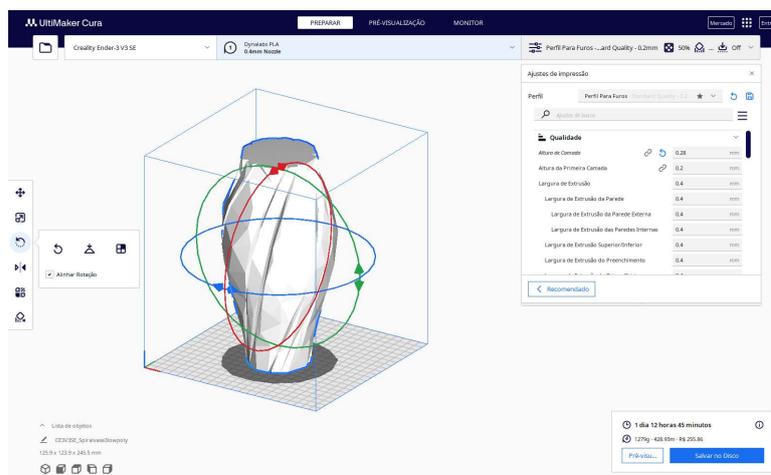
<b>PROPRIEDADES MECÂNICAS:</b>	<b>PLA Carbon</b>	<b>PLA Comum</b>
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,24	1,19
Temperatura de amolecimento (°C)	67	55
Resistência a tração (MPa)	60	53
Alongamento até ruptura (%)	15	6
Resistência ao impacto Izod (entalhado kJ/m <sup>2</sup> )	18	16
Resistência a flexão (MPa)	62	83
Dureza (Shore D)	68	-
Temperatura de impressão recomendada	225°C	200 °C

### 3.3. Parâmetros de Impressão e Matriz de Teste

#### 3.2.1. Software de Impressão

O software utilizado neste estudo foi o Ultimaker Cura 5.7.1. Este fatiador é amplamente reconhecido no universo da impressão 3D, sua interface amigável e a possibilidade de personalizar mais de 400 parâmetros permitem aos usuários personalizar detalhadamente os parâmetros de fatiamento, otimizando o processo de impressão para alcançar resultados precisos e de alta qualidade. Na Figura 19 é apresentada a interface do programa.

**Figura 19.** Interface Ultimaker Cura 5.7.1 (Autor, 2024)



#### 3.2.2. Parâmetros de Impressão

O processo de impressão 3D é sensivelmente influenciado por uma variedade de parâmetros, como temperatura, velocidade de impressão, densidade de preenchimento, resolução de camada e geometria de suporte. Esses parâmetros desempenham papéis fundamentais na determinação da qualidade final da peça impressa, afetando sua precisão, resistência e aparência superficial. Compreender e otimizar esses parâmetros é essencial para alcançar resultados de alta qualidade na impressão 3D.

Os parâmetros de impressão selecionados para este estudo foram velocidade de impressão, orientação das camadas e a altura de camada, sendo que a matriz de experimentos foi obtida pelo método *Design of Experiments* (DOE), empregando o método Box-Behoken. Foi gerada uma matriz de testes para cada material estudado, a qual é mostrada na Tabela 4. Para cada uma das variáveis de estudo, foram gerados três valores diferentes. Assim, a matriz de testes gerada consistiu em 15 condições diferentes de impressão para cada material.

A densidade de preenchimento de 100% e o número de filetes de 2 foram mantidos constantes em todos os testes.

A temperatura de impressão utilizada para o PLA foi de 200°C para o PLA comum e 225°C para o PLA reforçado com fibras de carbono, conforme recomendada pelo fabricante.

**Tabela 4.** Matriz de testes obtida por DOE.

Número do teste	Espessura de camada (mm)	Orientação (graus)	Velocidade de impressão (mm/s)
1	0,20	0	100
2	0,20	45	100
3	0,20	0	150
4	0,20	90	50
5	0,20	45	100
6	0,20	45	100
7	0,12	45	150
8	0,12	45	50
9	0,28	0	100
10	0,20	90	150
11	0,12	90	100
12	0,28	45	50
13	0,20	0	50
14	0,28	45	150
15	0,28	90	100

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Dureza Shore D

Os valores de dureza Shore D referentes à média aritmética e o desvio padrão para cada conjunto de amostras são apresentados na Tabela 5. No Apêndice II são mostrados gráficos de todas as medidas de dureza.

**Tabela 5.** Resultados obtidos nos ensaios de dureza Shore D.

Grupo	Média da Dureza Shore D	Desvio Padrão
PLA com fibras de carbono		
Corpo de prova 1	77,00	0,17
Corpo de prova 2	77,02	0,22
Corpo de prova 3	76,90	0,64
PLA comum		
Corpo de prova 1	75,55	0,79
Corpo de prova 2	76,17	0,27
Corpo de prova 3	76,42	0,31

Os resultados mostraram que o PLA com fibra de carbono apresentou valores de dureza similares ao PLA comum. O fabricante do filamento com fibra de carbono disponibiliza o valor de dureza de 68 na escala Shore D, enquanto a média obtida no experimento foi maior, alcançando uma dureza

média de aproximadamente 76 na escala Shore D. Para o PLA comum, embora o fabricante não tenha fornecido o valor de dureza, comparações com a literatura indicam que os resultados obtidos no experimento do PLA comum apresentam, em média, 10% maior que a literatura (Silva, 2022; Pereira 2023).

Observou-se também uma pequena variação nos valores de dureza num mesmo grupo de corpos de prova (ver Apêndice II), a qual pode ser associada ao processo de impressão FDM que pode criar vazios internos na peça. Segundo Carneiro et al. (2019), esse problema pode ser minimizado aumentando o fluxo de preenchimento durante a impressão, o que torna o material mais maleável e favorece o preenchimento dos vazios. Contudo, tal ajuste pode comprometer a precisão dimensional das peças.

## 4.2. Resistência a Tração

As Tabelas 6 e 7 mostram os valores médios de resistência à tração e deformação na ruptura para os materiais estudados e no Apêndice I são mostradas todas as curvas tensão x deformação.

A resistência a tração do PLA variou entre 12 MPa e 42,5 MPa, dependendo dos parâmetros de impressão utilizados. Para o PLA reforçado com fibras de carbono, a resistência à tração ficou entre 21,2 MPa e 36,3 MPa. Dessa forma, observa-se que o PLA com fibras de carbono apresenta uma menor dependência dos parâmetros de impressão em comparação com o PLA puro.

Quanto à deformação na ruptura, o PLA apresentou valores entre 1,3% e 4,7%, enquanto o PLA com fibras de carbono apresentou uma faixa bem mais ampla, variando de 2,6% a 26,7%.

Estes resultados indicam que o PLA puro é mais dependente dos parâmetros de impressão, pois sua resistência interlaminar é mais sensível à adesão entre camadas. O PLA com fibras de carbono tem menor variação na resistência e maior ductilidade devido à presença das fibras, que melhoram a adesão e distribuem as tensões de maneira mais uniforme. As diferenças nos modos de fratura entre os materiais serão abordadas no item 4.3.

Os efeitos de cada um dos parâmetros de impressão variados na resistência a tração e na deformação, obtidos por meio de análise estatística aplicando DOE, são mostrados nas Figuras 21 e 22 para o PLA comum e nas Figuras 23 e 24 para o PLA com fibras, respectivamente. Todos os parâmetros tiveram influência significativa nos resultados ( $p > 0,005$ ).

**Tabela 6.** Resultados obtidos nos ensaios de tração do PLA comum.

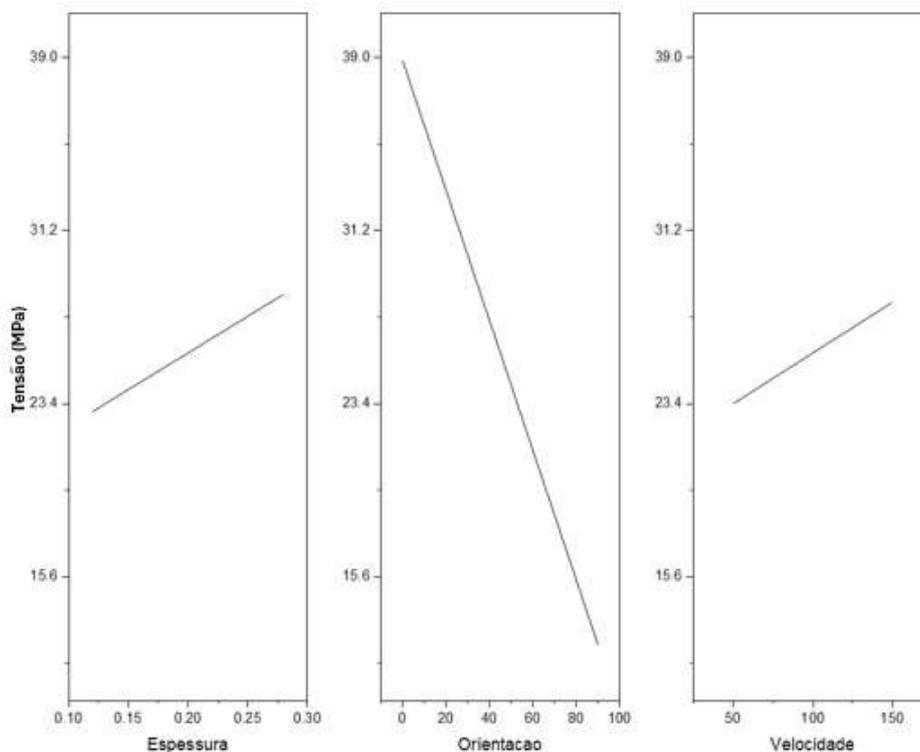
Grupo	Tensão Máxima Média (MPa)	Desvio Padrão Tensão Máxima (MPa)	Maior Valor Tensão (MPa)	Deformação Média (%)	Desvio Padrão Deformação (%)	Maior Valor Deformação (%)
PLA Grupo 1	14,94	0,32	15,19	1,93	0,13	2,08
PLA Grupo 2	27,94	3,2	33,35	3,30	0,44	3,72
PLA Grupo 3	19,20	2,3	23,03	2,40	0,35	2,82
PLA Grupo 4	42,59	3,2	45,55	3,86	0,47	4,49
PLA Grupo 5	20,84	1,9	23,39	2,51	0,23	2,95
PLA Grupo 6	22,25	4,34	29,83	2,60	0,38	3,20
PLA Grupo 7	20,84	2,22	23,83	2,46	0,17	2,75
PLA Grupo 8	15,00	1,93	17,42	1,82	0,19	2,08
PLA Grupo 9	16,09	1,68	18,87	1,97	0,16	2,19
PLA Grupo 10	41,16	2,29	43,63	3,59	0,21	3,81
PLA Grupo 11	37,49	3,54	43,48	3,15	0,28	3,62
PLA Grupo 12	21,38	1,65	23,71	2,23	0,06	2,27
PLA Grupo 13	12,14	2,22	16,94	1,31	0,24	1,74

PLA Grupo 14	26,78	2,26	29,92	3,62	0,40	4,20
PLA Grupo 15	45,18	1,53	46,84	4,77	0,20	4,97

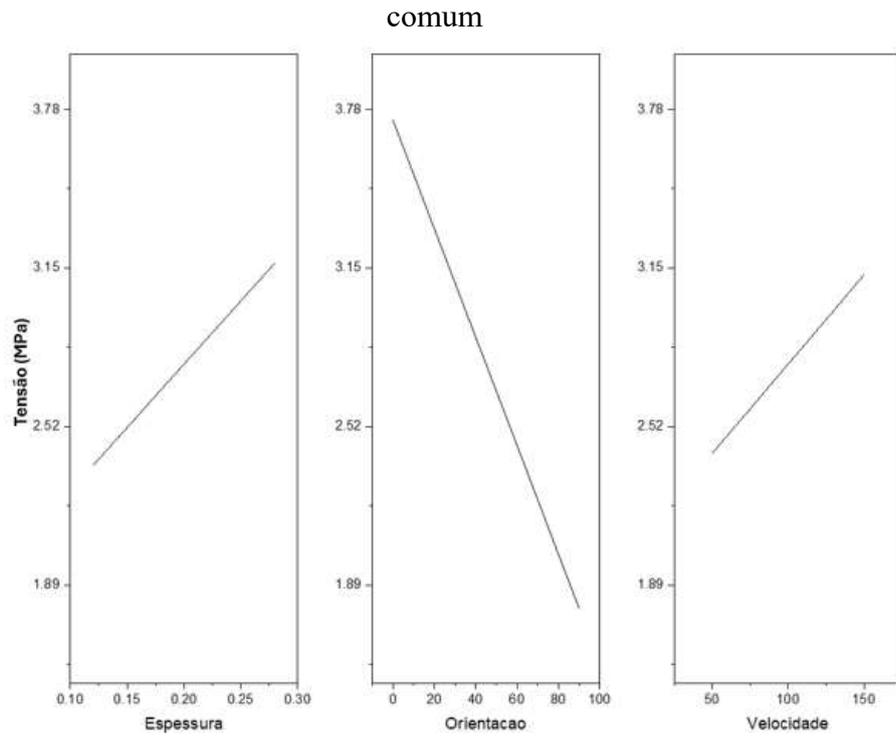
**Tabela 7.** Resultados obtidos nos ensaios de tração do PLA com fibras de carbono

Grupo	Tensão Máxima Média (MPa)	Desvio Padrão Tensão Máxima (MPa)	Maior Valor Tensão Máxima (MPa)	Deformação Média (%)	Desvio Padrão Deformação (%)	Maior Valor Deformação (%)
PLA + C Grupo 1	36,35	1,37	37,50	24,84	10,74	37,82
PLA + C Grupo 2	29,50	1,22	31,60	6,02	0,51	6,57
PLA + C Grupo 3	37,79	0,97	39,25	26,09	6,43	37,77
PLA + C Grupo 4	21,72	0,54	22,49	2,97	0,08	3,05
PLA + C Grupo 5	24,12	2,06	27,39	4,20	0,38	4,90
PLA + C Grupo 6	25,46	1,09	27,46	4,59	0,10	4,70
PLA + C Grupo 7	25,81	1,01	27,49	5,01	0,28	5,45
PLA + C Grupo 8	21,61	0,99	22,94	2,62	0,19	2,82
PLA + C Grupo 9	35,15	0,67	36,06	26,73	14,42	42,89
PLA + C Grupo 10	19,60	0,44	20,15	4,17	0,37	4,67
PLA + C Grupo 11	34,05	2,41	36,41	5,92	2,12	9,34
PLA + C Grupo 12	26,08	0,46	26,50	9,27	1,43	10,86
PLA + C Grupo 13	21,24	2,60	23,33	2,71	0,66	3,69
PLA + C Grupo 14	25,66	1,43	28,08	6,16	0,66	7,04
PLA + C Grupo 15	19,43	0,62	20,18	4,77	0,81	5,48

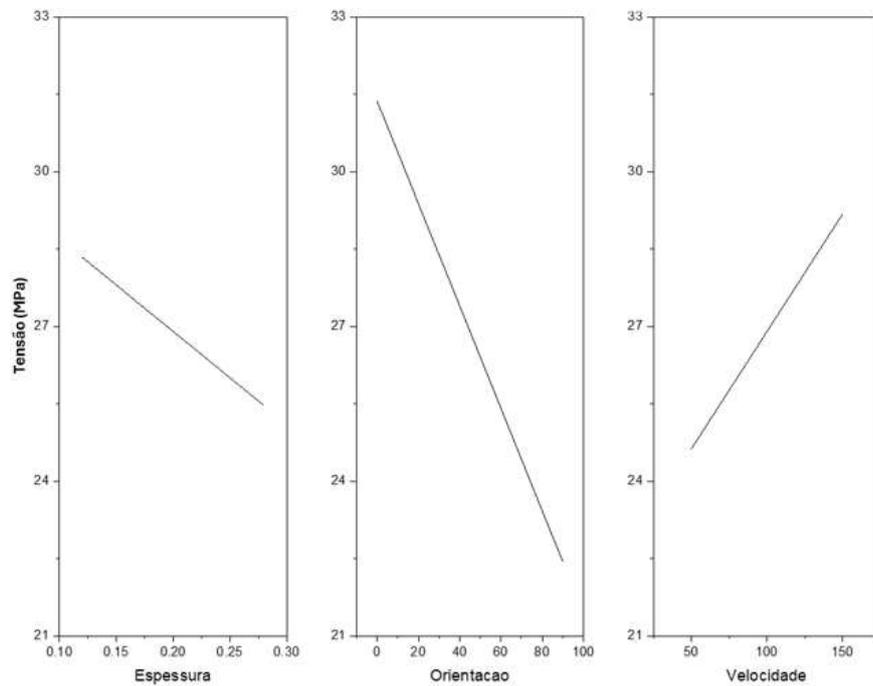
**Figura 20.** Influência dos parâmetros de impressão na tensão máxima do PLA comum



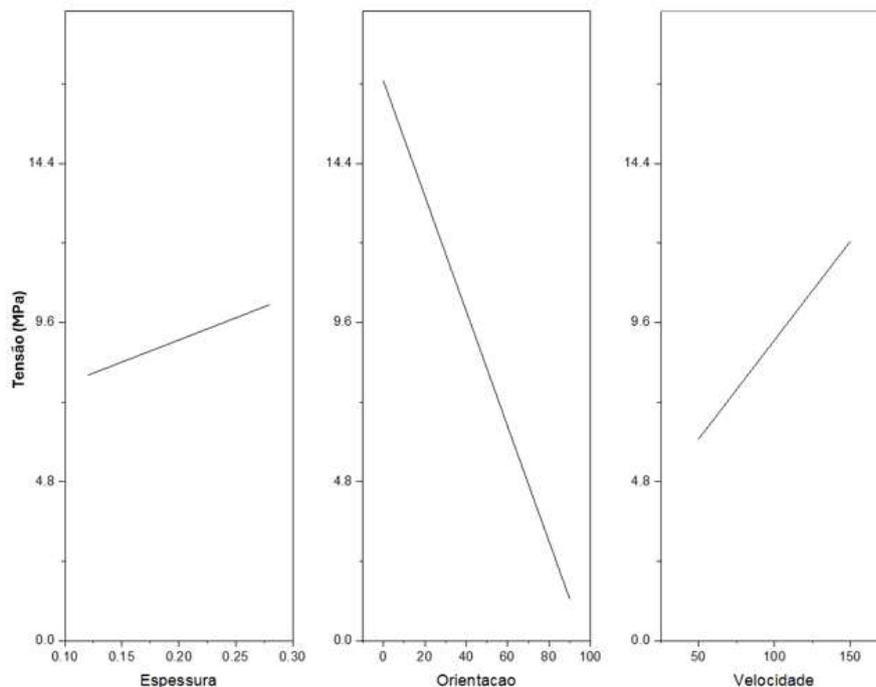
**Figura 21.** Influência dos parâmetros de impressão na deformação na ruptura (%) do PLA



**Figura 23.** Influência dos parâmetros de impressão comparados com a tensão máxima do PLA com fibras de carbono



**Figura 24.** Influência dos parâmetros de impressão comparados com a deformação na ruptura (%) do PLA com fibras de carbono



#### 4.2.1. Influência da espessura das camadas na resistência mecânica

Como a espessura das camadas na impressão 3D afetam diretamente a densidade do material, esta tem influência direta nas propriedades mecânicas. Embora, em muitos casos, a redução da espessura da camada na impressão 3D seja associada a um aumento na resistência mecânica devido à melhor adesão entre camadas, o comportamento observado para o PLA foi diferente. Isso pode estar relacionado com o fato de que com camadas mais espessas, há menos interfaces interlaminares na peça. Como as interfaces entre camadas são regiões críticas onde as falhas geralmente se iniciam, uma menor quantidade de interfaces pode reduzir a probabilidade de falhas por delaminação. Isso é especialmente relevante para peças em que a resistência mecânica depende da adesão interlaminar, como em esforços perpendiculares às camadas. Um outro fator que pode influenciar é que camadas mais espessas geralmente significam que mais material é depositado por passada do bico extrusor. Isso pode aumentar o tempo em que o material permanece quente, promovendo uma fusão mais completa entre a camada recém-depositada e a anterior. A fusão mais efetiva pode melhorar a coesão entre camadas e reduzir a formação de vazios ou falhas de adesão.

Entretanto, para o PLA com fibras de carbono camadas mais finas promoveram um aumento na resistência a tração, provavelmente devido a maior adesão entre camadas, reduzindo a formação de vazios. Isso pode indicar que as fibras de carbono funcionam como reforços estruturais. Além disso, a falha mecânica é tipicamente desviada pela presença das fibras, resultando em um caminho de fratura mais tortuoso. Camadas mais finas poderiam amplificar esse efeito, pois há mais superfícies de interação entre fibras e matriz, aumentando a resistência. Já no PLA puro, o comportamento é diferente porque a resistência depende unicamente da adesão entre camadas. Camadas mais finas aumentam o número de interfaces, potencializando regiões frágeis.

#### 4.2.2. Influência da orientação das camadas na resistência mecânica

Sabe-se que a orientação das camadas é crucial para a resistência mecânica de peças impressas por FDM. Conforme esperado, tensões aplicadas paralelamente às camadas resultaram em maior resistência, enquanto tensões perpendiculares diminuíram a resistência devido ao efeito da baixa adesão interlaminar. O efeito da orientação das camadas na resistência à tração foi menos pronunciado no PLA com fibras de carbono. Isto pode ser explicado pela presença das fibras de carbono que alteram a distribuição das tensões e reforçam as interfaces entre camadas.

### 4.2.3. Influência da velocidade de impressão na resistência mecânica

A velocidade de impressão em peças feitas por impressão 3D (FDM) afeta diretamente a qualidade do acabamento, adesão interlaminar e resistência mecânica do material. Esse parâmetro controla a rapidez com que o bico extrusor deposita o material, influenciando o tempo de resfriamento, fusão entre camadas e formação de defeitos. Observou-se que para ambos os materiais o aumento da velocidade de impressão melhorou a resistência a tração. Uma explicação para isso é que em velocidades mais altas, o material é extrudado mais rapidamente, mantendo-se mais quente durante a deposição. Isso pode melhorar a fusão entre as camadas, aumentando a adesão interlaminar. O material extrudado tende a ser depositado de maneira mais uniforme e com menor tempo para resfriamento irregular e a menor permanência do bico sobre cada região pode diminuir o risco de sobreposição inadequada ou retração do material.

### 4.3. Análise da superfície de fratura

Imagens de microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura em tração do PLA puro e do PLA com fibras são mostradas para alguns parâmetros de impressão nas Figuras 25 e 26, respectivamente, para ilustrar os modos de fratura.

A superfície do PLA rompido em tração apresentou aspecto de fratura frágil, para todos os parâmetros de impressão. Já para o PLA reforçado com fibras de carbono, observa-se fratura dúctil com algumas fibras sendo puxadas na ruptura por tração.

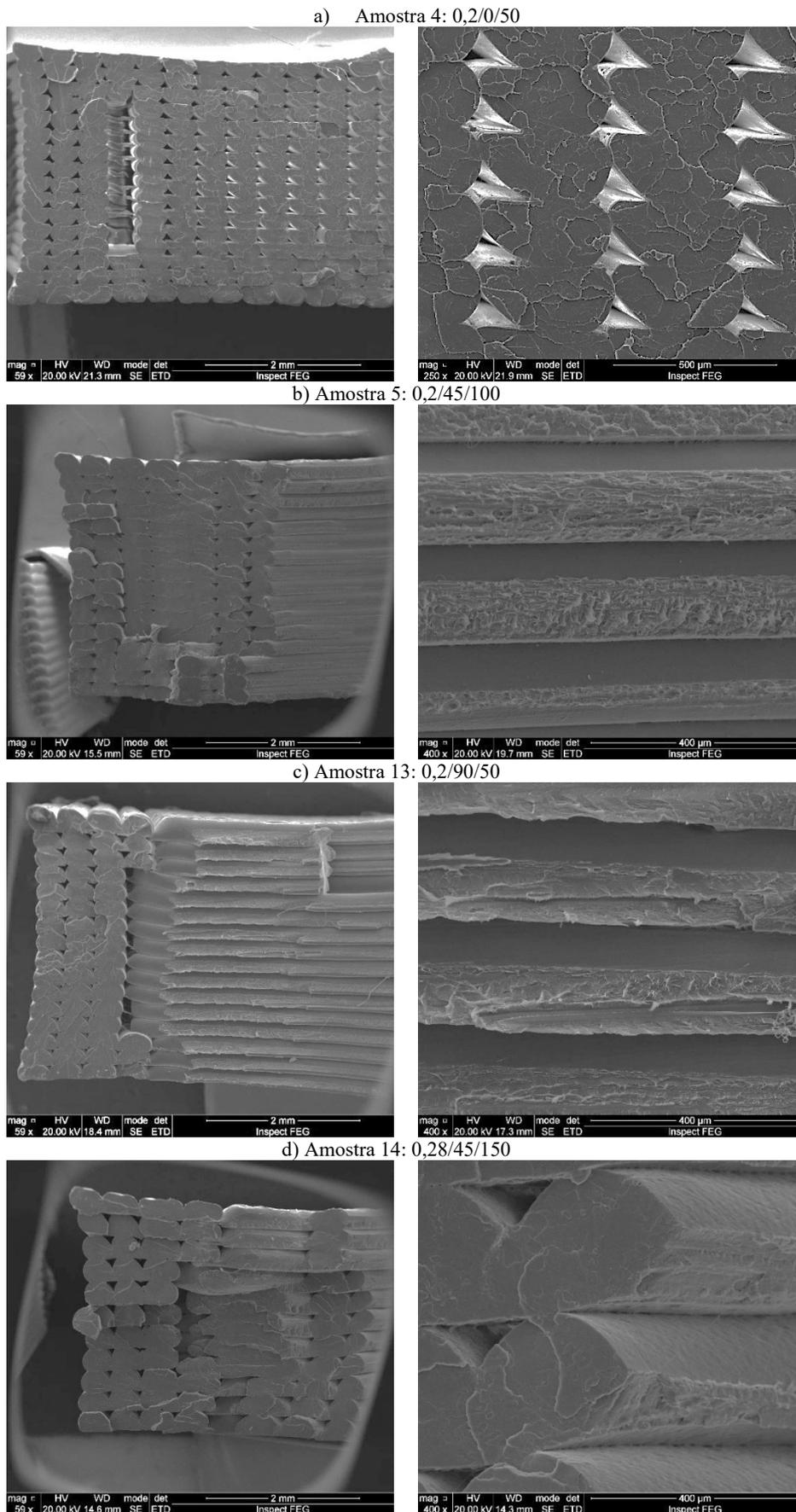
Quando a tensão de tração foi aplicada paralelamente às camadas, a superfície de fratura mostrou uma separação clara entre as linhas da impressão, indicando uma falha interlaminar. Já quando a tensão de tração foi aplicada perpendicularmente às camadas, a superfície de fratura é plana, mas com as camadas ainda unidas. Quando a tensão de tração foi aplicada num ângulo de 45°, a fratura ocorreu ao longo de planos inclinados devido à orientação oblíqua das camadas.

O PLA geralmente apresenta comportamento frágil em carregamentos de tração, conforme tem sido reportado na literatura (Silva, 2022; Pereira, 2023), a qual é caracterizada por uma ruptura rápida e com pouca ou nenhuma deformação plástica antes da falha. Isso resulta em superfícies de fratura com bordas afiadas e aparência "vítrea" ou brilhante. A fragilidade do PLA à temperatura ambiente está associada com sua temperatura de transição vítrea de 60°C.

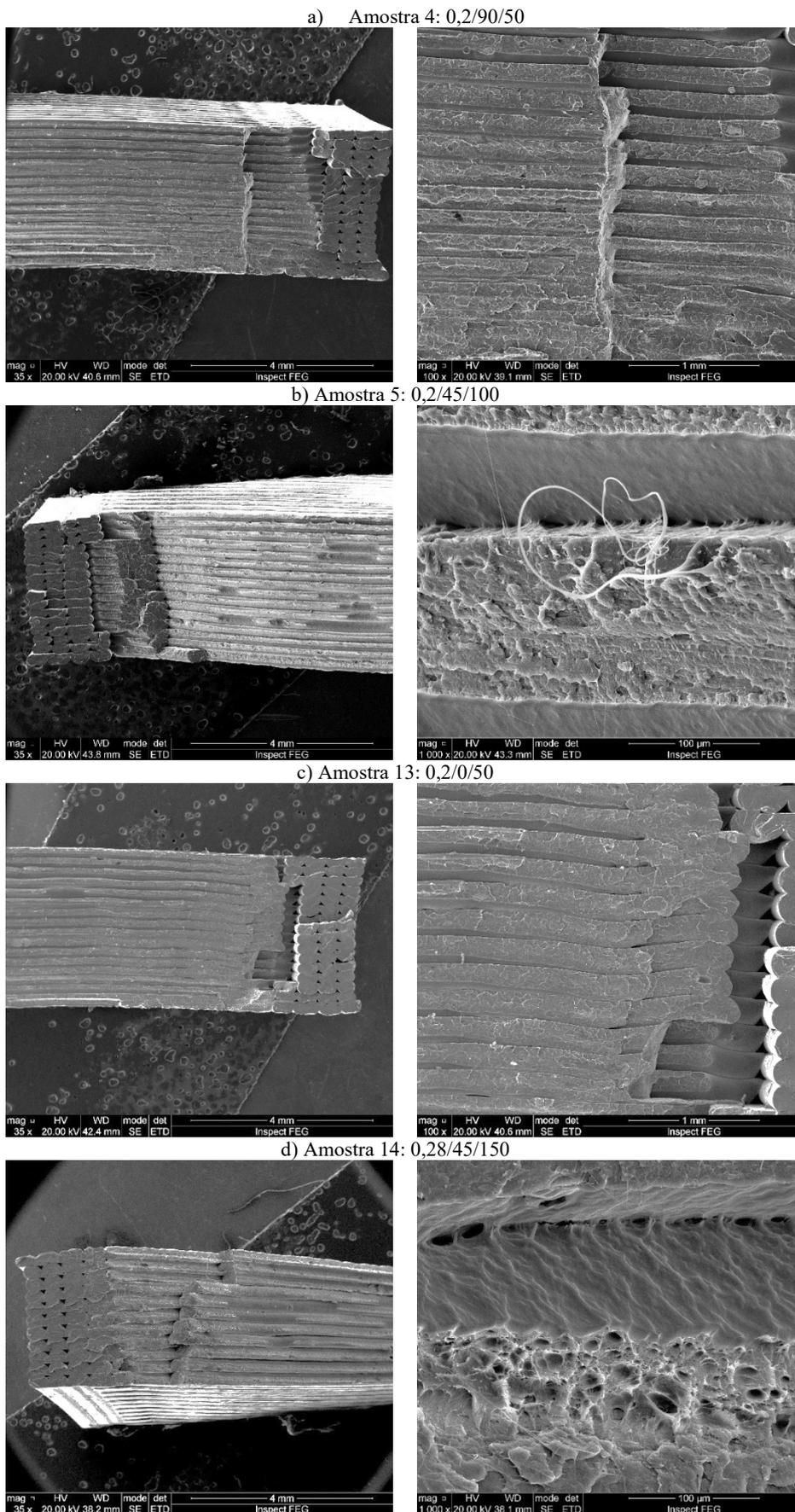
Pode-se observar que em presença das fibras de carbono a aparência da superfície tornou-se mais rugosa devido à interação entre a matriz e as fibras. Além disso, nota-se a presença de "Dimples", característico da fratura dúctil.

É importante mencionar que vazios ou imperfeições na peça impressa, comuns em FDM, podem influenciar o aspecto da fratura. Regiões onde o PLA não fluiu adequadamente ou onde houve má fusão entre camadas podem aparecer como "Dimples" ou separações evidentes.

**Figura 25.** Imagens de MEV da morfologia da superfície de fratura em tração do PLA para diferentes parâmetros de impressão



**Figura 26.** Imagens de MEV da morfologia da superfície de fratura em tração do PLA com fibras para diferentes parâmetros de impressão.



## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de impressoras 3D tem tido crescimento significativo nos últimos anos, com destaque para a técnica FDM (*Fused Deposition Modeling*), destacando-se principalmente pelo baixo custo de aquisição e muita informação sobre o assunto disponível em diferentes mídias. Essa popularização transformou a impressão 3D, que inicialmente era voltada apenas para grandes indústrias, em uma ferramenta para a produção de componentes e peças com aplicações práticas e funcionais. Nesse contexto, o estudo detalhado dos parâmetros de impressão torna-se essencial para compreender o desempenho das peças produzidas, especialmente quando estas são submetidas a forças externas, garantindo maior confiabilidade e eficiência em suas aplicações.

De modo geral, o PLA com fibra de carbono mostrou maior valor de resistência a tração e maior deformação até a ruptura, sendo que a tensão máxima e a deformação máxima alcançadas foram de 36,34 MPa e 24,83%, respectivamente. Esse comportamento é provavelmente reflexo da contribuição das fibras de carbono na transferência de carga, atuando como reforços estruturais que distribuem melhor as tensões ao longo do material. Além disso, as fibras podem promover uma melhor coesão entre as camadas depositadas durante o processo de impressão 3D, reduzindo a ocorrência de falhas interlaminares e aumentando a integridade estrutural da peça final. Estes resultados evidenciam o potencial uso deste material para aplicações que demandam alta resistência mecânica e alta ductilidade. Já as durezas se mantiveram relativamente próximas, independente dos parâmetros avaliados.

## 6. AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão às pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao Giovanni dos Santos Batista, por sua generosidade em Silva, T.D.A. Análise da Influência dos parâmetros de Impressão 3D no comportamento estrutural de peças fabricadas com materiais poliméricos utilizando o processo FDM (*Fused Deposition Modeling*). 27 compartilhar seu conhecimento e me auxiliar na elaboração e análise dos resultados da matriz DOE, contribuindo de forma significativa para a qualidade deste trabalho.

Ao Gustavo Vasques, técnico do laboratório de materiais da PUCRS, por sua dedicação e suporte na elaboração dos testes de tração e dureza das amostras, fornecendo um suporte técnico essencial para o desenvolvimento desta pesquisa. À minha orientadora,

Professora Eleani Maria da Costa, que, com sua vasta experiência e orientação precisa, foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho. Sua expertise foi uma fonte de inspiração e aprendizado durante todo o processo.

Aos meus pais, Sueli Almeida e Paulo Roberto, que sempre estiveram ao meu lado em todos os momentos, oferecendo não apenas apoio e orientação acadêmica, mas também os valores que me moldaram ao longo da vida. Sua presença foi indispensável para que eu chegasse até aqui.

Ao meu grande amigo Silas Pires, pela amizade, incentivo e apoio incondicional ao longo de toda a minha graduação. Sua confiança em mim foi um estímulo constante para continuar avançando.

Aos meus familiares, amigos e minha namorada, pelo apoio, compreensão e palavras de encorajamento que me acompanharam durante todo o curso, mesmo nos momentos mais difíceis. A presença de vocês tornou essa jornada mais leve e significativa.

A todos, meu mais sincero obrigado. Este trabalho é, também, um reflexo de tudo o que recebi de vocês

## 7. REFERÊNCIAS

- 3DAPPLICATIONS. (08 de 03 de 2023). *O QUE É O FILAMENTO PLA USADO NA IMPRESSÃO 3D?* Fonte: 3dapplications: <https://www.3dapplications.com.br/2023/03/08/o-que-e-o-filamento-pla-usado-na-impressao-3d/>
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D2240 - Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D638 - Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.
- ARAUJO, Gabriel Gazetta de. A Impressão 3D e os Parâmetros que influenciam o Produto Final. 2016. 62 f. Centro Universitário Eurípides de Marília, Fundação de Ensino “Eurípides Soares da Rocha”, Marília, 2016.
- AROCKIAM. A.J. et al. A review on PLA with different fillers used as a filament in 3D printing. *Materials Today: Proceedings* 50 (2022) 2057–2064.
- BERLANDI, M. (15 de 11 de 2021). *O que é a manufatura aditiva? Uma introdução*. Fonte: Deviante: <https://www.deviante.com.br/noticias/o-que-e-a-manufatura-aditiva-uma-introducao/>
- BOLELLI, Raquel Meirelles; LEBRÃO Guilherme Wolf. Avaliação das Propriedades de Material Poduzido por FDM em Impressora 3D. 2019. 10p. Instituto Mauá de Tecnologia, Brasil.
- CABREIRA, Vinicius. Avaliação dos parâmetros de processamento em impressão 3D nas propriedades do poliácido láctico. Porto Alegre. 2018. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.
- CARDOSO, G. C., Tavares, K. L., & Magnagnagno, O. A. (06 de 2021). IMPRESSÃO 3D: UM FUTURO PROMISSOR PARA A MEDICINA. *Revista Thêma et Scientia*, 11, 205.
- CARNEIRO, I. A. (13 de 11 de 2019). *HP e VW: carros impressos em 3D chegam em 2021, pelo menos em parte*. Acesso em 09 de 11 de 2024, disponível em TecMundo: <https://www.tecmundo.com.br/produto/147702-hp-vw-carros-impressos-3d-chegam-em-2021-em-parte.htm#:~:text=Gra%C3%A7as%20a%20uma%20parceria%20entre,recebe%20o%20m%C3%A9rito%20pela%20capacidade.>
- CARNEIRO, Luiz; BARBAR, George; SANTOS, Lara; GUARATO, Alexandre. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DA MESA DE IMPRESSÃO 3D NA DUREZA E 75 DIMENSÕES GEOMÉTRICAS DE AMOSTRAS EM ABS. 10.26678/ABCM.CREEM2019.CRE2019-0046. 2019.
- CHEN, Q. et al. Intra/inter-ply shear behaviors of continuous fiber reinforced thermoplastic composites in thermoforming processes. *Composite Structures* 93 (2011) 1692–1703
- EMBRAPII. (27 de 09 de 2023). *Impressão 3D: Como a manufatura aditiva pode transformar a indústria*. Acesso em 10 de 11 de 2024, disponível em Embrapii: <https://embrapii.org.br/impressao-3d-como-a-manufatura-aditiva-pode-transformar-a->



MONEZI, V. G., & Okada, R. H. (2021). *MÉTODO DE PRODUÇÃO DE CALÇADO IMPRESSO EM 3D*. Taquaritinga: Faculdade de Tecnologia de Taquaritinga.

OLIVEIRA, N., Lisboa Neto, A., Sandini, T. M., Santos, A. C., Martins, D., & Ambrosio, C. (09 de 2017). Bioimpressão e produção de mini-órgãos com células tronco. *Pesq. Vet. Bras*, pp. 1032-1039.

PEREIRA, E.S. Desenvolvimento de framework para seleção automatizada de parâmetros para processos de impressão 3D Por extrusão de filamento termoplástico fundido. TRABALHO DE CONCLUSÃO. Curso de Engenharia Mecânica, PUCRS, 2023.

POPESCU, D. et al. FDM process parameters influence over the mechanical properties of T polymer specimens: A review. *Polymer Testing* 69 (2018) 157–166

RESEARCHGATE. (5 de 11 de 2020). *Schematic-diagram-of-a-front-feeding-directed-energy-deposition-DED-process\_fig1\_346638408*. Fonte: Researchgate: [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-a-front-feeding-directed-energy-deposition-DED-process\\_fig1\\_346638408](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-a-front-feeding-directed-energy-deposition-DED-process_fig1_346638408)

ROSA, L. A.. *Tecnologia de impressão 3D aplicada a suportes de calçado como ferramenta do merchandising visual*. Universidade do Minho, (2018).

SILVA, M.F. Relação dos parâmetros de impressão com propriedades mecânicas de peças poliméricas obtidas por impressão 3D pela técnica FDM. DISSERTAÇÃO. PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS- PUCRS, 82p., 2022.

SISTEMAS, L. (30 de 11 de 2024). *Série Neo® Estereolitografia*. Fonte: LWT Sistemas: <https://www.lwtsistemas.com.br/2023/03/17/serie-neo-blog/>

SHAHRUBUDIN, N., CHUAN, L., & RAMLAN, R. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. *2nd International Conference on Sustainable Materials Processing and Manufacturing*. (2019, Agosto)

TOFFOLI, Henrique Tirolli. Projeto, Melhoria e construção de uma máquina de prototipagem rápida: "Impressora 3D". Maringá. 2018. 40p. Trabalho de Final de Curso (Graduação em Engenharia em Controle e Automação). Faculdade Unicesumar, Brasil.

TECMUNDO. (10 de 09 de 2024). *Astronautas criam primeira peça de metal no espaço com impressão 3D*. Fonte: TecMundo: <https://www.tecmundo.com.br/ciencia/289351-astronautas-fabricam-primeira-peca-metal-espaco-impressao-3d.htm>

TOPCAR, B. (06 de 07 de 2020). *BMW investe em tecnologia para impressão 3D na Alemanha*. Acesso em 09 de 11 de 2024, disponível em Bmw Top Car: <https://www.bmwtopcar.com.br/noticias/bmw-investe-em-tecnologia-para-impressao-3d-na-alemanha.html>

VOLPATO, N. (2018). *Manufatura aditiva tecnologias e aplicações da impressão 3D*. São Paulo: Blucher.

WISHBOX. (19 de 11 de 2019). *Tudo Sobre Impressão 3D: O Que é, Como Funciona e Tipos*. Fonte: WishBox: <https://www.wishbox.net.br/blog/impressao-3d/>

ZIAEE, M., & CRANE, N. (2019). *Binder Jetting: A Review of Process, Materials, and Methods*. Brigham Young University.

## 8. APÊNDICES

### Resultados ensaios de tração

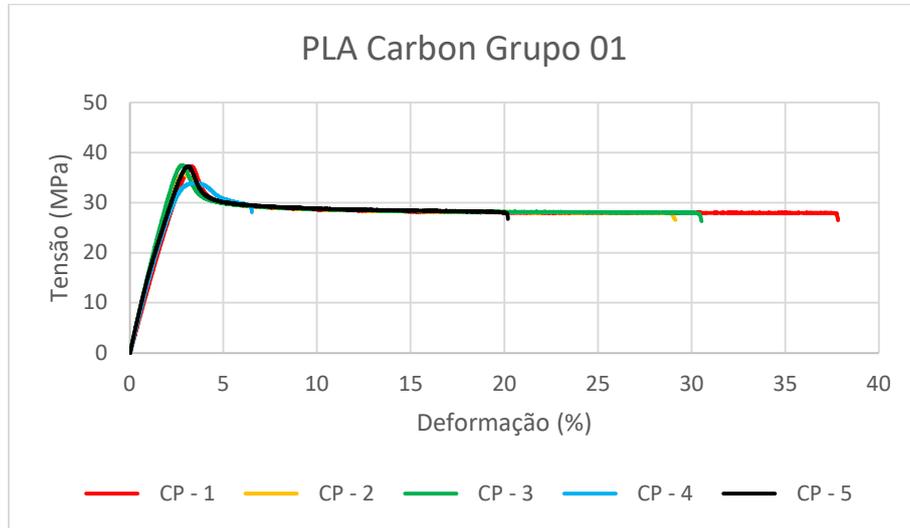


Figura 7: Gráfico tensão x deformação. Parâmetros: Altura de camada: 0,12mm, Velocidade: 100mm/min, Orientação: 0 graus

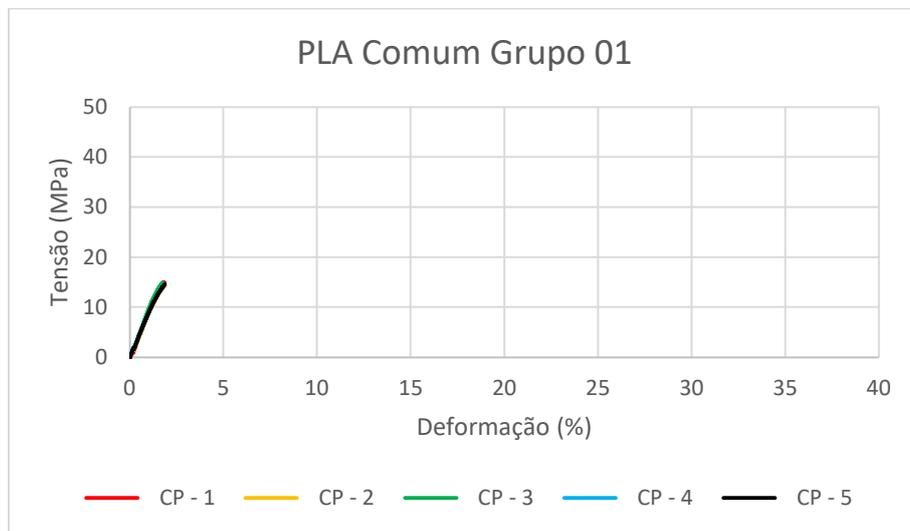


Figura 8: Gráfico tensão x deformação. Parâmetros: Altura de camada: 0,12mm, Velocidade: 100mm/min, Orientação: 0 graus

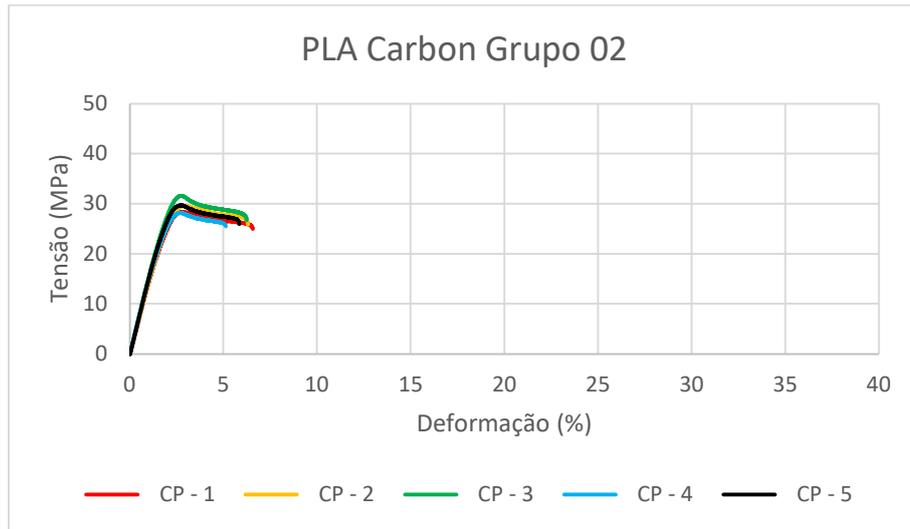


Figura 9: Gráfico tensão x deformação. Parâmetros: Altura de camada: 0,2mm, Velocidade: 100mm/min, Orientação: 45 graus.

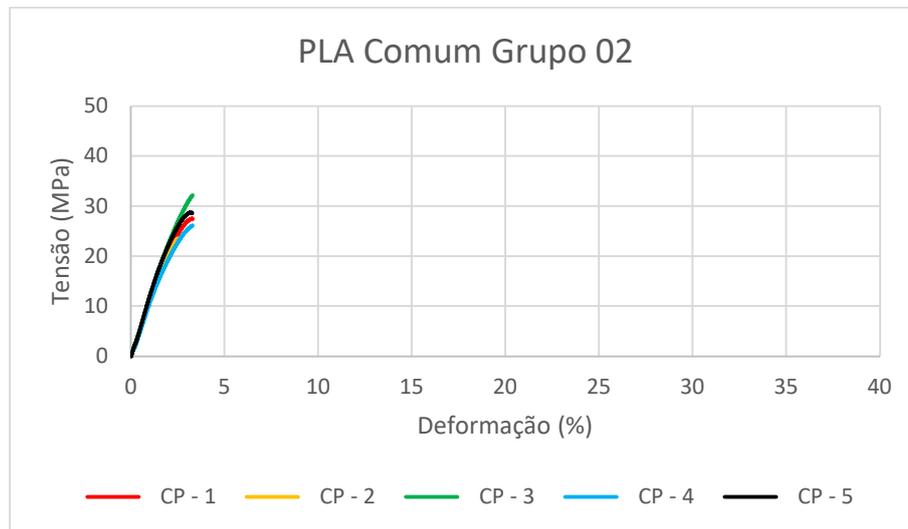


Figura 10: Gráfico tensão x deformação. Parâmetros: Altura de camada: 0,2mm, Velocidade: 100mm/min, Orientação: 45 graus.

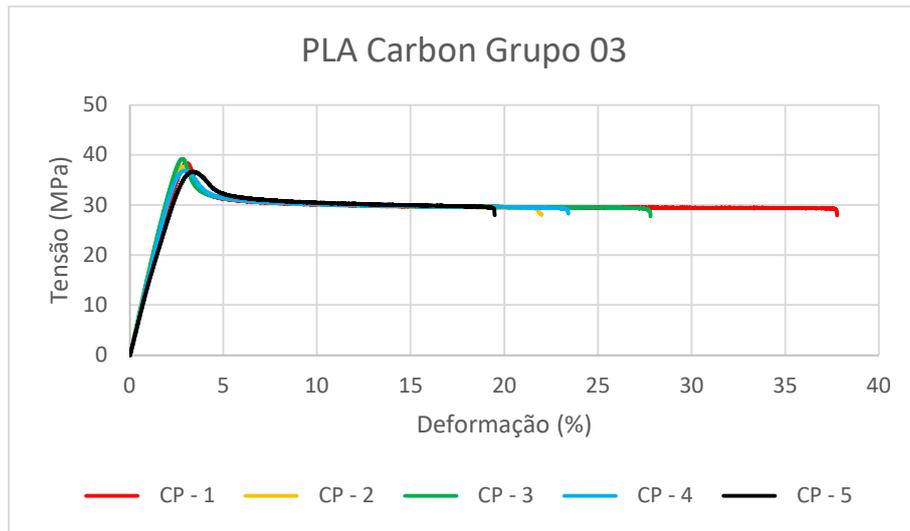


Figura 11: Gráfico tensão x deformação. Parâmetros: Altura de camada: 0,2mm, Velocidade: 150mm/min, Orientação: 45 graus.

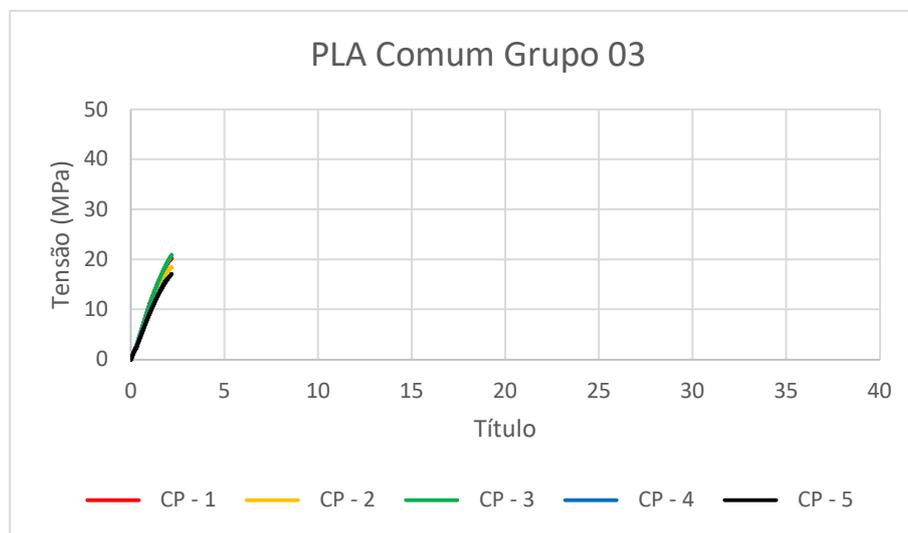


Figura 12: Gráfico tensão x deformação. Parâmetros: Altura de camada: 0,2mm, Velocidade: 150mm/min, Orientação: 45 graus

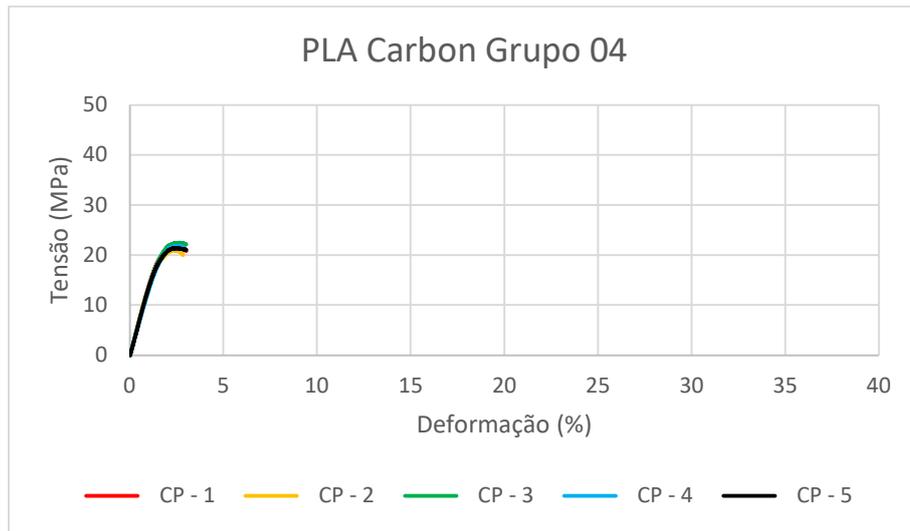


Figura 13: Gráfico tensão x deformação. Parâmetros: Altura de camada: 0,2mm, Velocidade: 50mm/min, Orientação: 90 graus

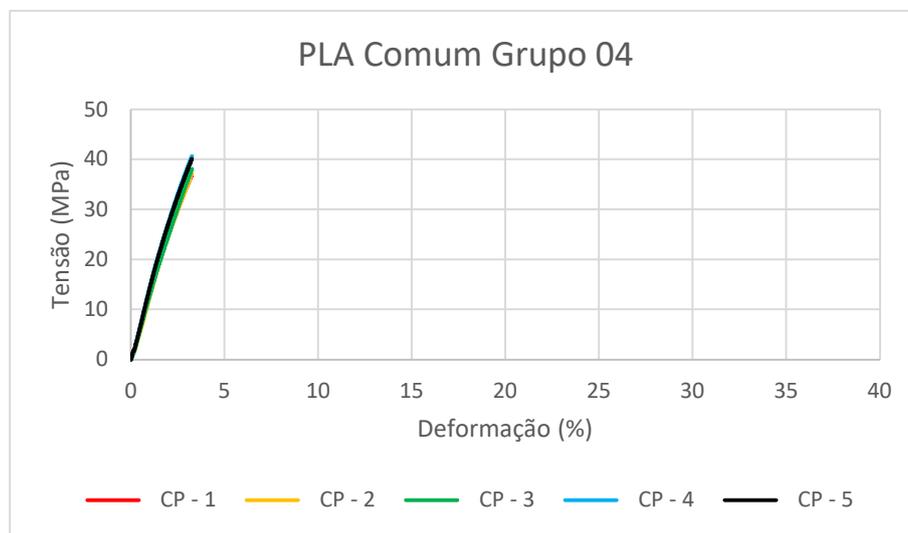


Figura 14: Gráfico tensão x deformação. Parâmetros: Altura de camada: 0,2mm, Velocidade: 50mm/min, Orientação: 90 graus

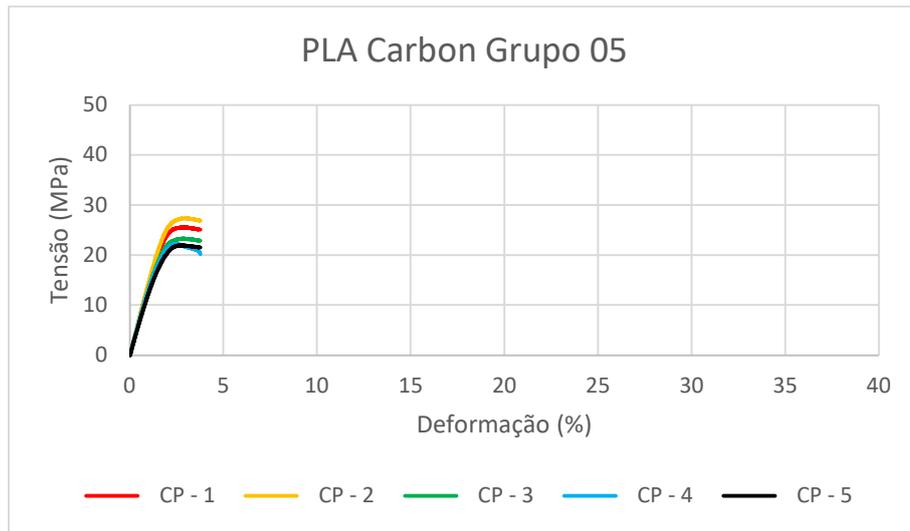


Figura 15: Gráfico tensão x deformação. Parâmetros: Altura de camada: 0,2mm, Velocidade: 100mm/min, Orientação: 45 graus

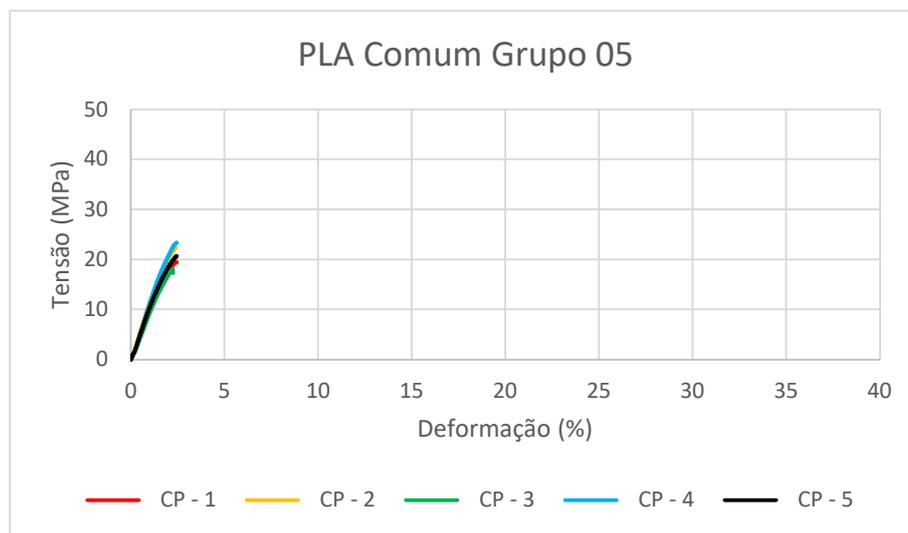


Figura 16: Gráfico tensão x deformação. Parâmetros: Altura de camada: 0,2mm, Velocidade: 100mm/min, Orientação: 45 graus

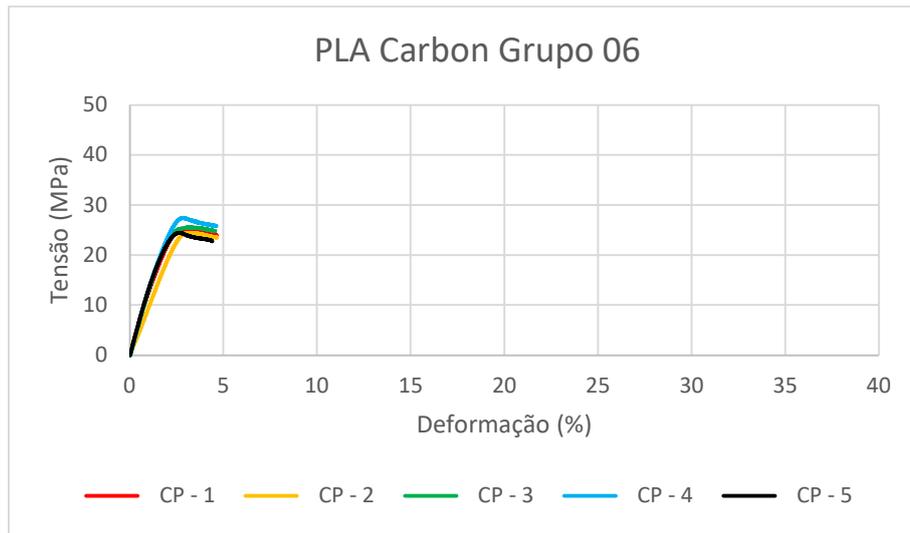


Figura 17: Gráfico tensão x deformação. Parâmetros: Altura de camada: 0,2mm, Velocidade: 100mm/min, Orientação: 45 graus

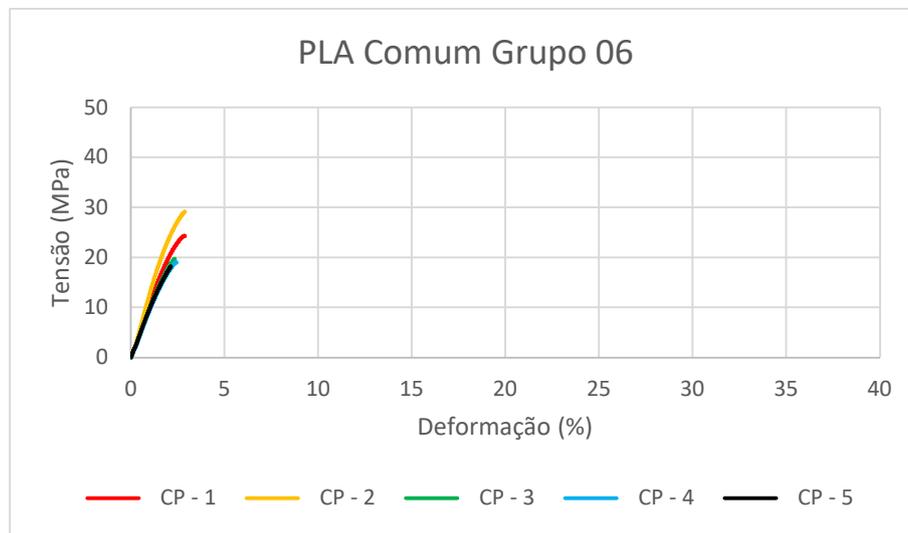


Figura 18: Gráfico tensão x deformação. Parâmetros: Altura de camada: 0,2mm, Velocidade: 100mm/min, Orientação: 45 graus

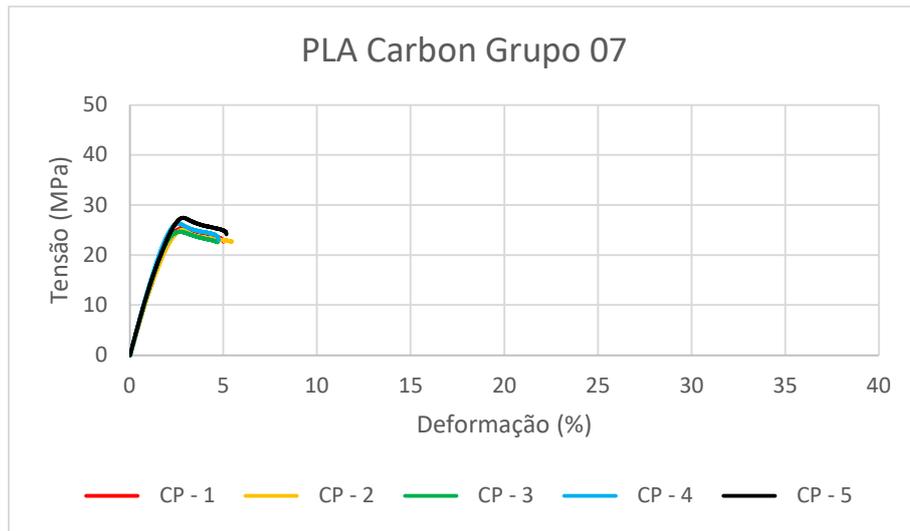


Figura 19: Gráfico tensão x deformação. Parâmetros: Altura de camada: 0,12mm, Velocidade: 150mm/min, Orientação: 45 graus

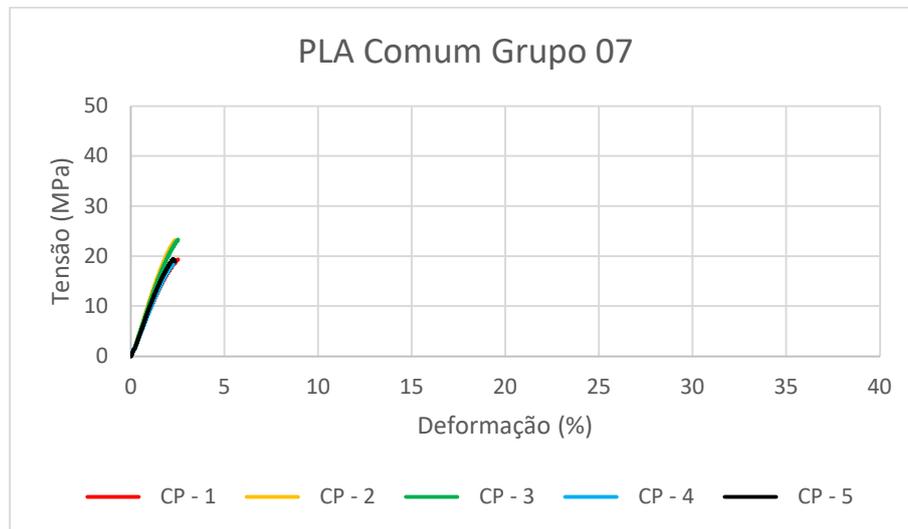


Figura 20: Gráfico tensão x deformação. Parâmetros: Altura de camada: 0,12mm, Velocidade: 150mm/min, Orientação: 45 graus

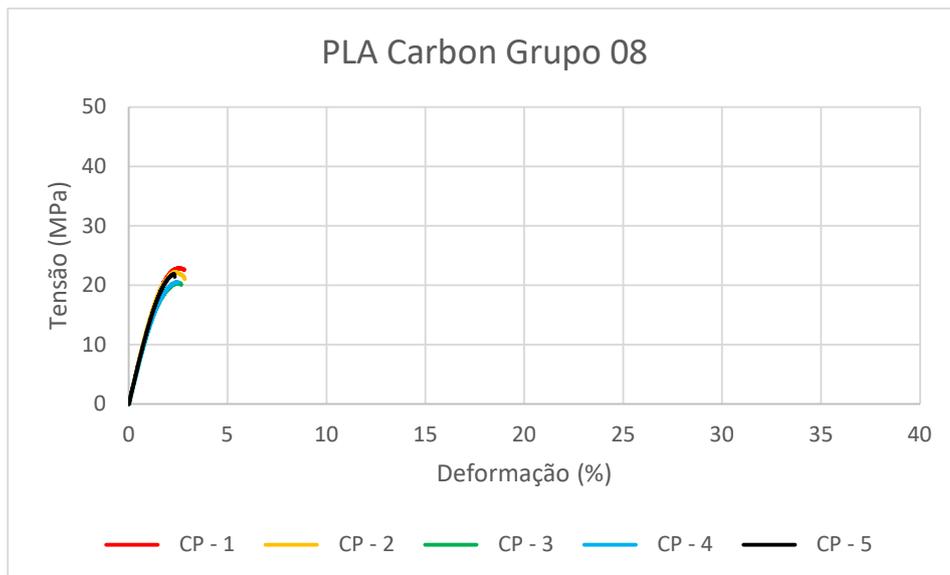


Figura 21: Gráfico tensão x deformação. Parâmetros: Altura de camada: 0,12mm, Velocidade: 50mm/min, Orientação: 45 graus

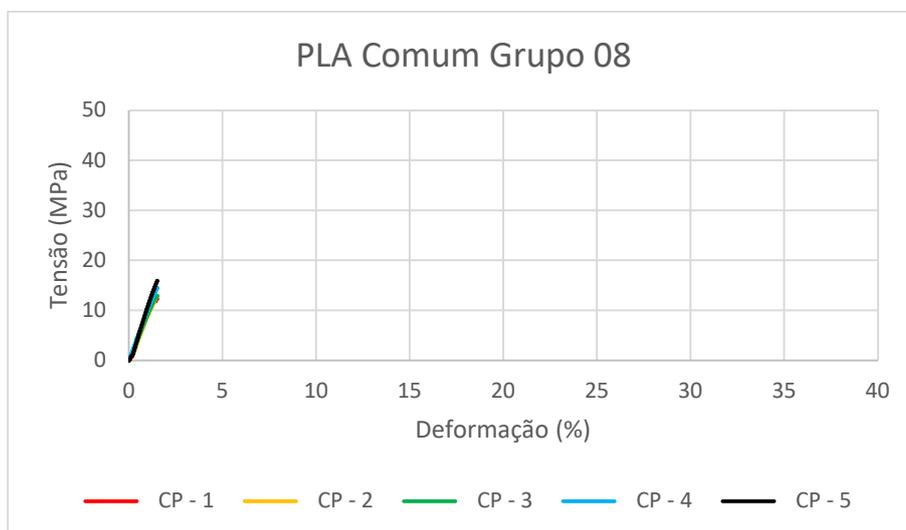


Figura 22 Gráfico tensão x deformação. Parâmetros: Altura de camada: 0,12mm, Velocidade: 50mm/min, Orientação: 45 graus

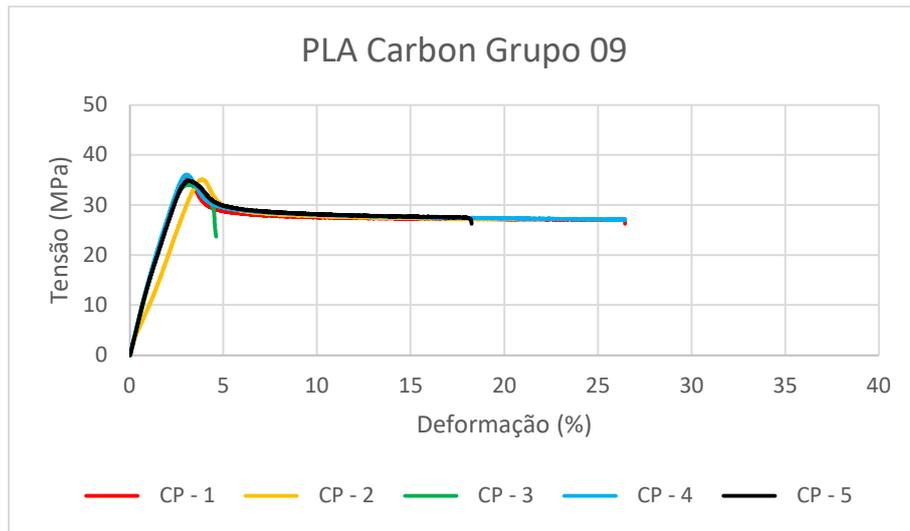


Figura 23: Gráfico tensão x deformação. Parâmetros: Altura de camada: 0,28mm, Velocidade: 100mm/min, Orientação: 0 graus

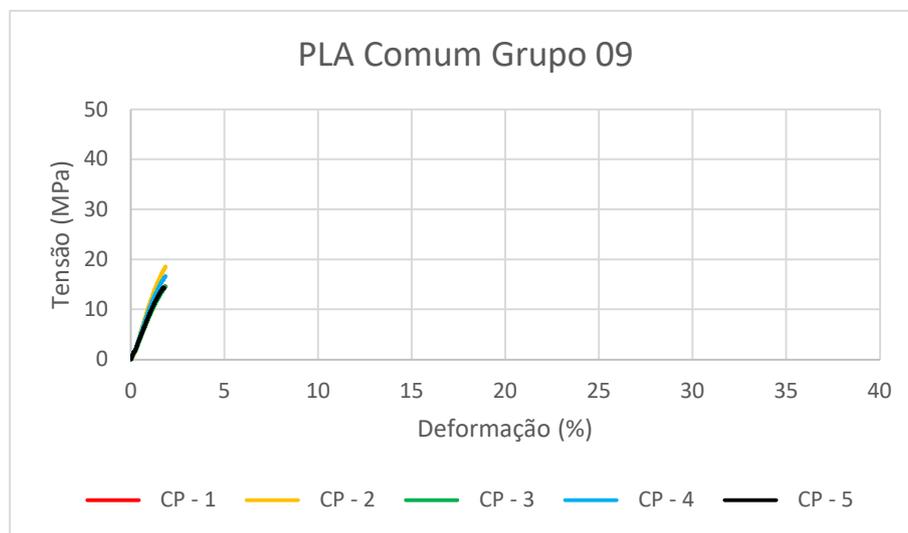


Figura 24: Gráfico tensão x deformação. Parâmetros: Altura de camada: 0,28mm, Velocidade: 100mm/min, Orientação: 0 graus

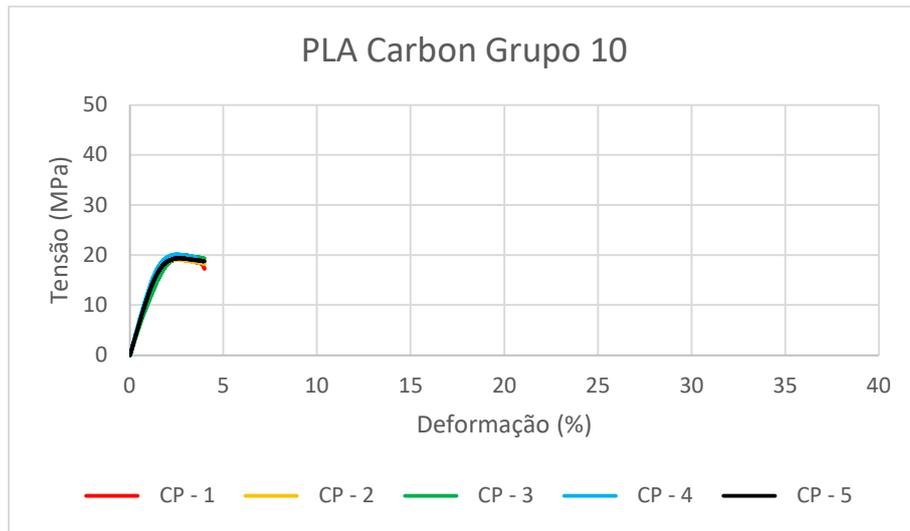


Figura 25: Gráfico tensão x deformação. Parâmetros: Altura de camada: 0,2mm, Velocidade: 150mm/min, Orientação: 90 graus

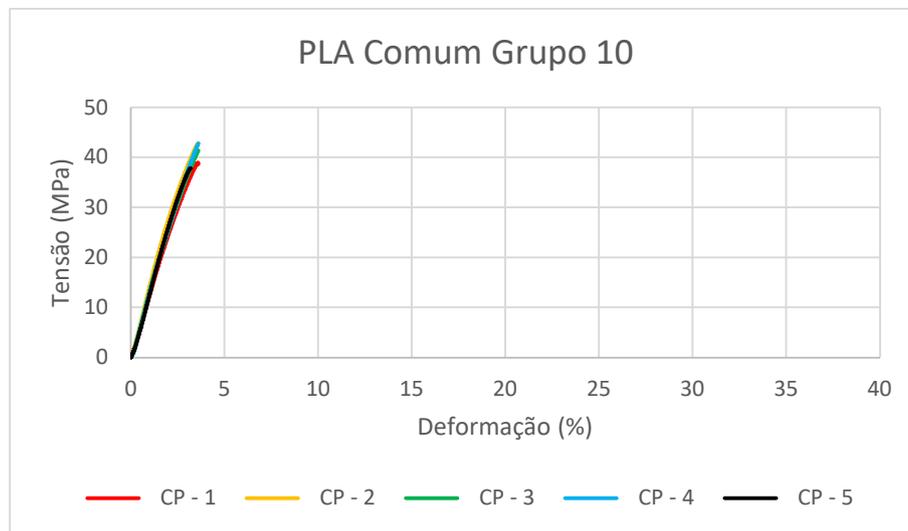


Figura 26: Gráfico tensão x deformação. Parâmetros: Altura de camada: 0,2mm, Velocidade: 150mm/min, Orientação: 90 graus

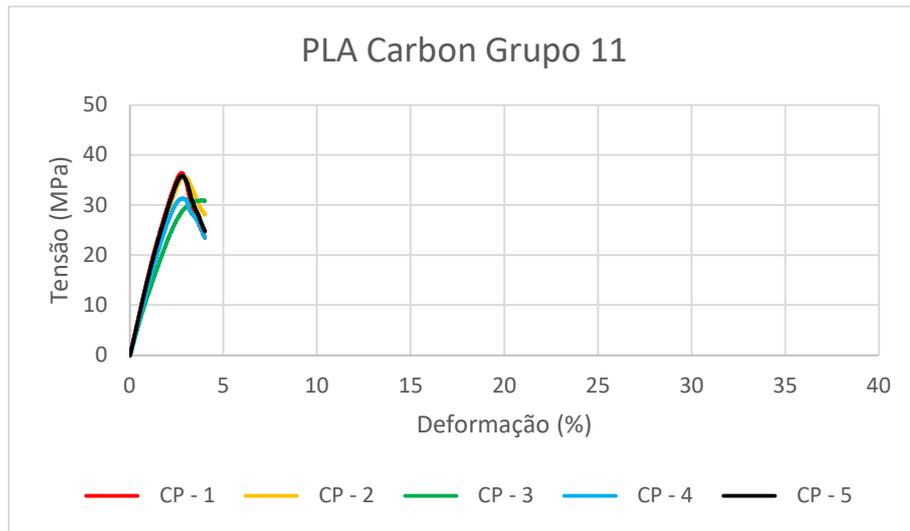


Figura 27: Gráfico tensão x deformação. Parâmetros: Altura de camada: 0,12mm, Velocidade: 100mm/min, Orientação: 90 graus

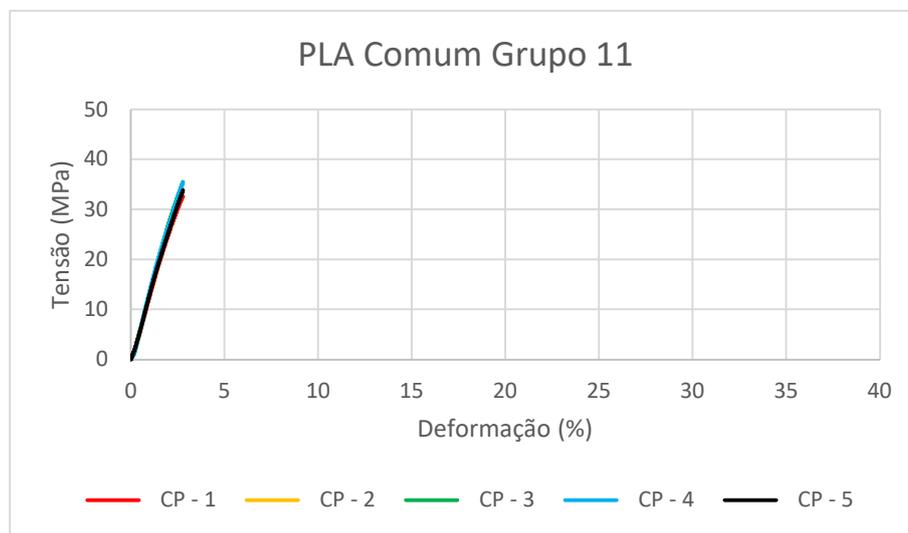


Figura 28: Gráfico tensão x deformação. Parâmetros: Altura de camada: 0,12mm, Velocidade: 100mm/min, Orientação: 90 graus

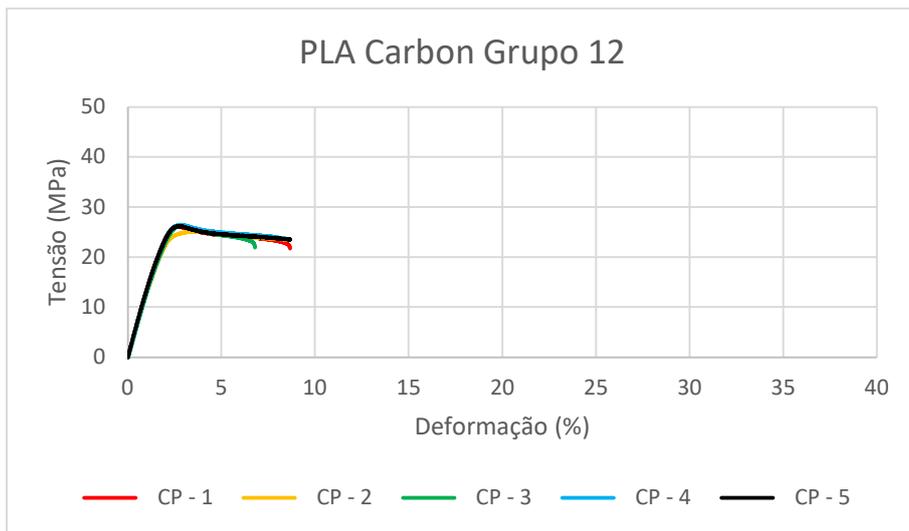


Figura 29: Gráfico tensão x deformação. Parâmetros: Altura de camada: 0,28mm, Velocidade: 50mm/min, Orientação: 45 graus

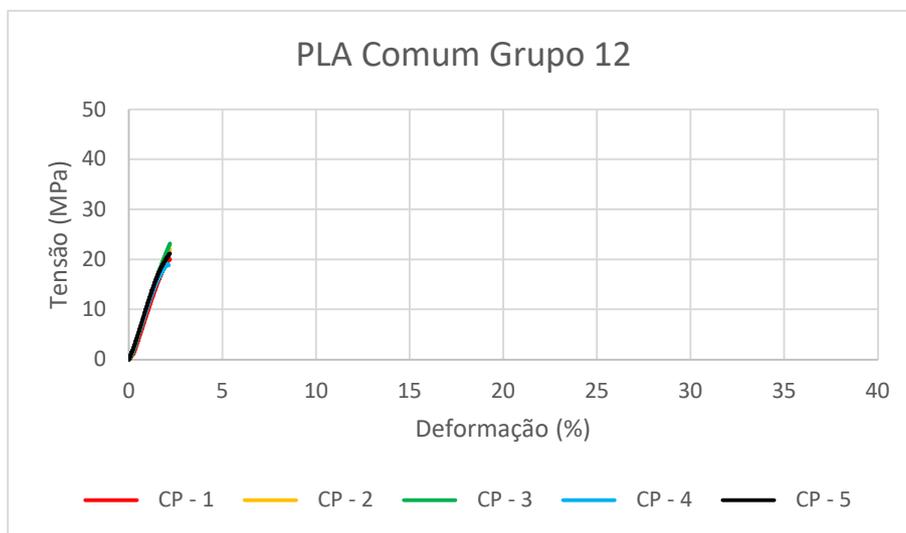


Figura 30: Gráfico tensão x deformação. Parâmetros: Altura de camada: 0,28mm, Velocidade: 50mm/min, Orientação: 45 graus

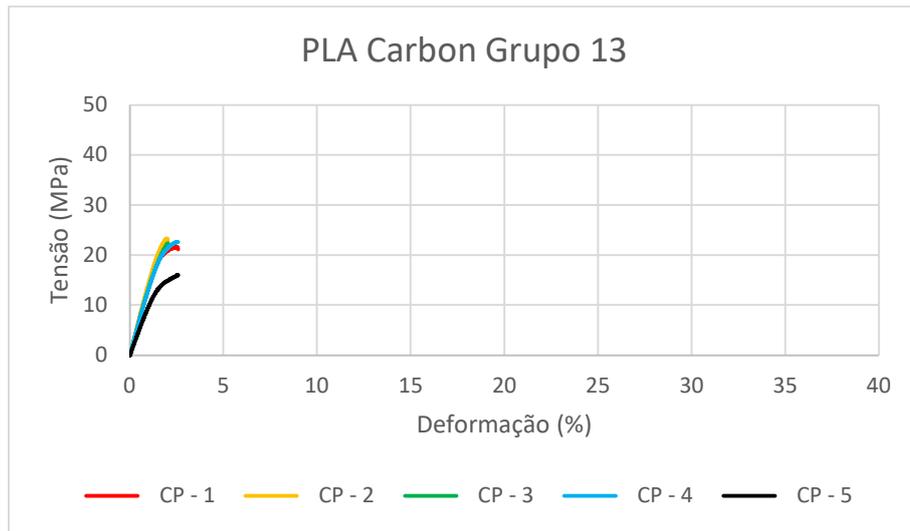


Figura 31: Gráfico tensão x deformação. Parâmetros: Altura de camada: 0,2mm, Velocidade: 50mm/min, Orientação: 0 graus

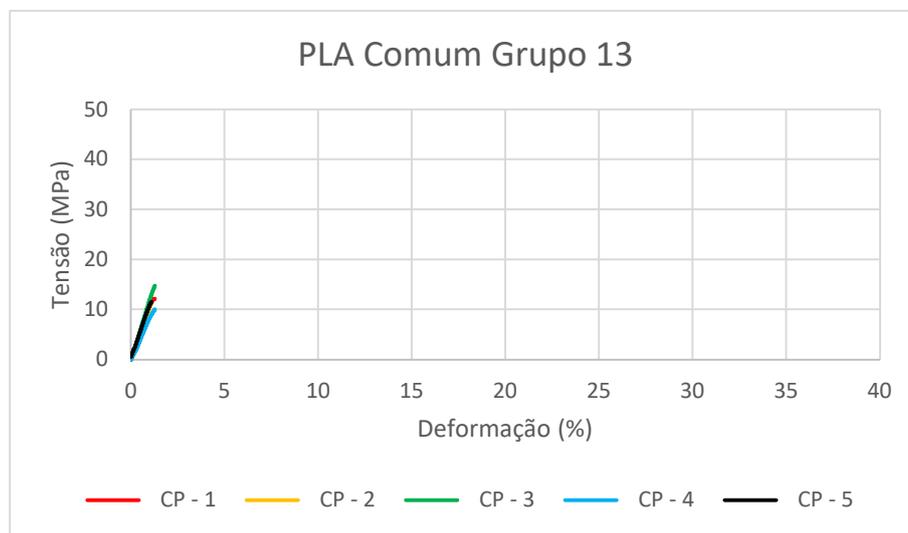


Figura 32: Gráfico tensão x deformação. Parâmetros: Altura de camada: 0,2mm, Velocidade: 50mm/min, Orientação: 0 graus

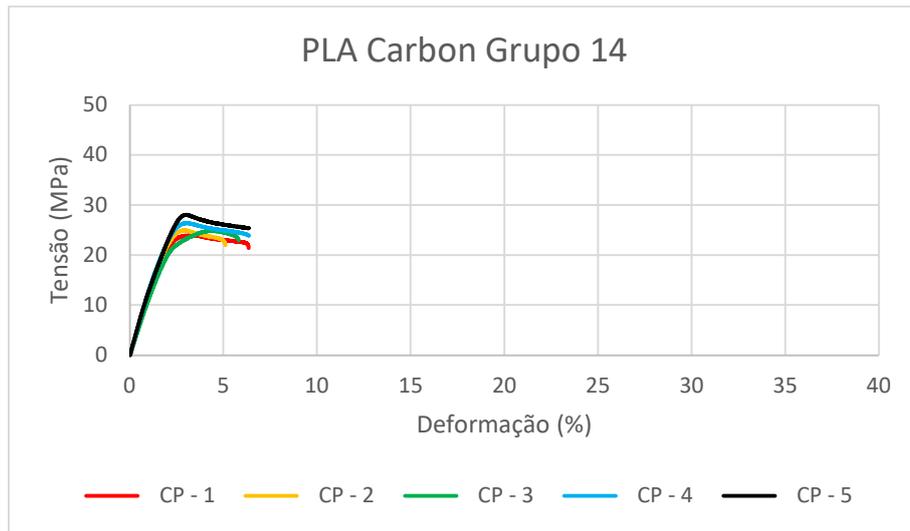


Figura 33: Gráfico tensão x deformação. Parâmetros: Altura de camada: 0,28mm, Velocidade: 150mm/min, Orientação: 45 graus

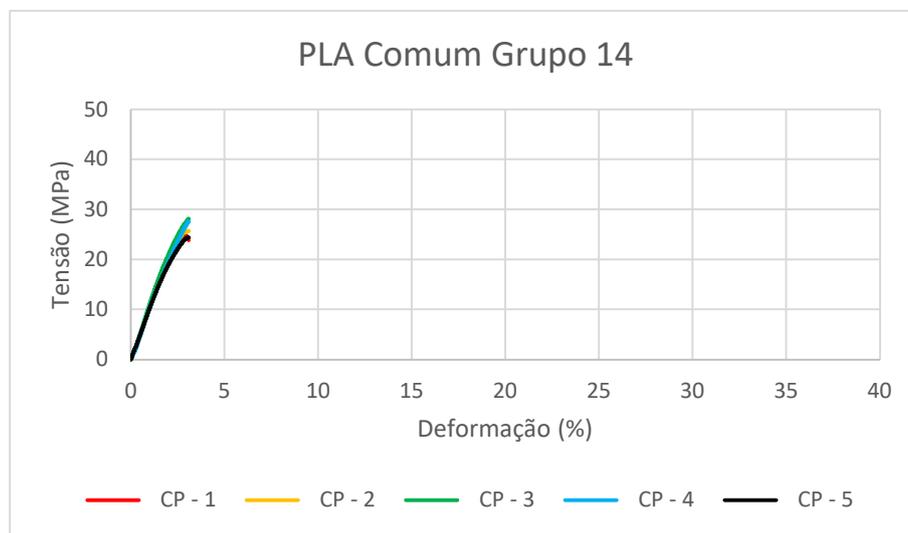
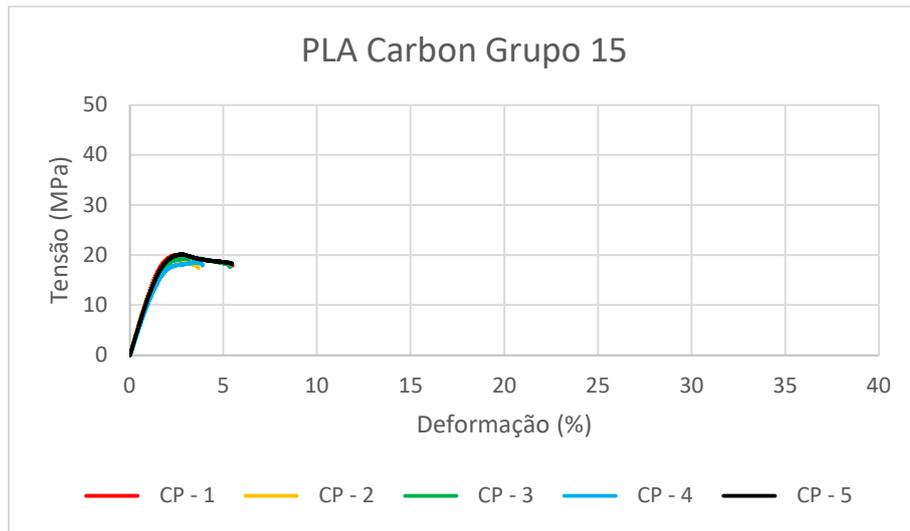
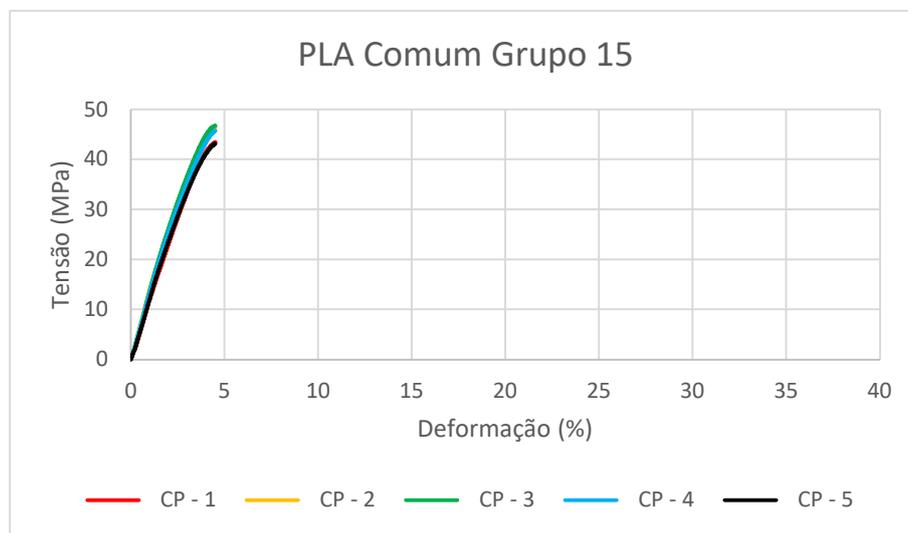


Figura 34: Gráfico tensão x deformação. Parâmetros: Altura de camada: 0,28mm, Velocidade: 150mm/min, Orientação: 45 graus

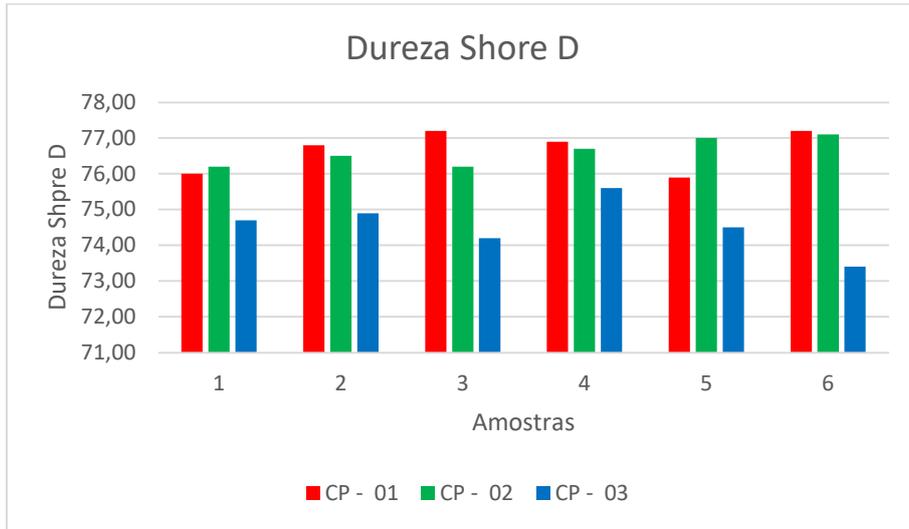


**Figura 35:** Gráfico tensão x deformação. Parâmetros: Altura de camada: 0,28mm, Velocidade: 100mm/min, Orientação: 90 graus

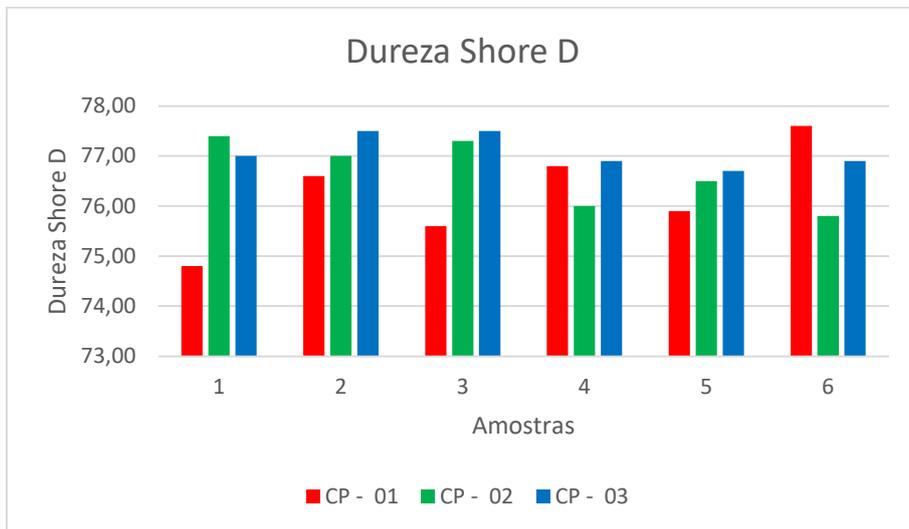


**Figura 36:** Gráfico tensão x deformação. Parâmetros: Altura de camada: 0,28mm, Velocidade: 100mm/min, Orientação: 90 graus

### Resultados das medidas de dureza



**Figura 38:** Gráfico resultados de dureza Shore D amostras PLA com fibras



**Figura 38:** Gráfico resultados de dureza Shore D amostras PLA comum