

## **Avaliação do Comportamento Mecânico de amostras de PLA produzido por Impressão 3D FFF utilizando modos heterogêneos de preenchimento.**

## **Evaluation of the Mechanical Behavior of PLA Samples Produced by FFF 3D Printing Using Heterogeneous Filling Modes.**

## **Evaluación del comportamiento mecánico de muestras de PLA producidas mediante impresión 3D FFF utilizando modos de llenado heterogéneos.**

Ana Carolina Machado de Oliveira<sup>1</sup>  
Tamires de Souza Nossa<sup>2</sup>

**Resumo:** A busca por materiais leves, resistentes e sustentáveis é cada vez mais intensa para suprir demandas industriais, e a impressão 3D está em alta, pois possibilita a produção de peças com geometrias complexas aliadas à redução do uso de matérias primas no processo. Esse estudo analisa ensaios de tração e flexão em amostras de PLA (poliácido-lático) produzidas por impressão 3D, utilizando a técnica de fabricação por filamento fundido (FFF). A análise de corpos de prova com preenchimentos heterogêneos demonstra que o parâmetro da densidade possui influência nas propriedades de resistência à tração e flexão.

**Palavras-chave:** Tração. Flexão. Fabricação por Filamento Fundido. Impressão 3D. Preenchimentos heterogêneos.

**Abstract:** The search for lightweight, resistant and sustainable materials is becoming increasingly intense in order to meet industrial demands, and 3D printing is on the rise, as it makes it possible to produce parts with complex geometries while reducing the use of raw materials in the process. This study analyzes tensile and flexural tests on PLA (polyacid-lactic acid) samples produced by 3D printing, using the fused filament fabrication (FFF) technique. The analysis of specimens with heterogeneous fillings shows that the density parameter has an influence on tensile and flexural strength properties.

**Keywords:** Tensile. Flexural. Fused Filament Manufacturing. 3D printing. Heterogeneous fillings.

**Resumen:** La búsqueda de materiales ligeros, resistentes y sostenibles es cada vez más intensa para satisfacer las demandas industriales, y la impresión 3D está en auge, ya que permite fabricar piezas con geometrias complejas reduciendo el uso de materias primas en el proceso. En este estudio se analizan ensayos de tracción y flexión en muestras de PLA (ácido poliácido-láctico) producidas mediante impresión 3D, utilizando la técnica de fabricación de filamento fundido (FFF). El análisis de muestras con rellenos heterogéneos muestra que el parámetro de densidad influye en las propiedades de resistencia a la tracción y flexión.

**Palabras-clave:** Tracción. Flexión. Fabricación de filamento fundido. Impresión 3D. Rellenos heterogéneos.

Submetido 15/01/2025

Aceito 10/03/2025

Publicado 02/04/2025

<sup>1</sup> Graduanda em Engenharia Mecânica. Instituto Federal de São Paulo Campus Itapetininga. ORCID: 009-0006-4926-0593. E-mail: [machado.ana@alunos.ifsp.edu.br](mailto:machado.ana@alunos.ifsp.edu.br)

<sup>2</sup> Pós-doutora em Ciência e Engenharia dos Materiais. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Itapetininga. <https://orcid.org/0000-0002-4715-5953>ORCID. E-mail: [tamires.nossa@ifsp.edu.br](mailto:tamires.nossa@ifsp.edu.br).

### Considerações Iniciais

No presente cenário a manufatura aditiva ou impressão 3D como também é conhecida, é uma tecnologia que se torna cada vez mais popular e difundida, sua primeira patente decorre de 1984 pelo cientista francês Alain Le Mehaute que desenvolveu essa alternativa para o método subtrativo, tão amplamente utilizado (Brischetto, 2017).

Desenvolver partes complexas com geometrias intrínsecas se tornou mais real com o advento da manufatura aditiva, não só isso, a produção de peças através de matérias primas ecologicamente viáveis, biodegradáveis, blendas e outras variações têm se tornado um tópico de pesquisa de elevado interesse e atenção (Brischetto, 2017). De acordo com Zapparoli (2019), a Impressão 3D tem um crescimento financeiro de 25% ao ano, de maneira que sua expansão no mercado se dá de maneira rápida.

O processo de impressão 3D diversas técnicas que podem ser utilizadas, algumas se apresentam mais eficientes quando consideramos consumo de matéria-prima, outras quando consideramos o consumo de tempo e assim por diante. Dentro do processo de manufatura aditiva a técnica de Fabricação por Filamento Fundido FFF, ou do inglês, FDM (Fused Deposition Modeling), é considerada uma das mais viáveis economicamente e de grande facilidade de manutenção sendo utilizado domiciliarmente e industrialmente (Pereira & Morales, 2014).

Assim como as técnicas de impressão, a matéria-prima a ser utilizada depende de diversas características e abrange um amplo leque de alternativas, de mais baratas a mais ecológicas. O PLA (poliácido-lático) é uma alternativa biodegradável em relação as opções em polímeros sintéticos comerciais, que vem sendo amplamente aplicados desde a década de 70. É um biopolímero com alta aplicabilidade na indústria de impressão 3D e uma opção de destaque com a crescente preocupação com o descarte de materiais plásticos e seu impacto ambiental (Harun *et al.*, 2009). Essa tecnologia alcançou rapidamente os setores industriais, desde o aeroespacial e automotivo até a medicina e alimentos (Al Rashid *et al.*, 2020).

Como uma técnica de alto interesse e alta aplicabilidade em diferentes indústrias, os estudos sobre a otimização do processo de impressão são variados, sendo os principais alvos de experimentação os parâmetros de impressão, tais quais padrões geométricos, porcentagem de preenchimento, direção de preenchimento, altura da camada, entre outros fatores (Rajan *et al.*,

2022). O crescente uso da impressão 3D na indústria tem como consequência a necessidade de estudos mais aprofundados sobre as propriedades mecânicas das peças produzidas, de maneira a assegurar uma melhor confiabilidade nas aplicações (Medeirzaos *et al.*, 2020).

A variação de preenchimento está conectada a diversos fatores, principalmente no que diz respeito aos custos investidos. Ao aplicar uma maior porcentagem de preenchimento é necessário um maior investimento em questão de material, tempo de máquina para impressão, o que gera por consequência maior gasto de energia.

O presente estudo discorre sobre a viabilidade de heterogeneização do preenchimento, ou seja, desenvolver peças com diferentes densidades em sua estrutura, uma área não tanto explorada entre os usuais focos de otimização.

## Referencial Teórico

### Manufatura Aditiva

A manufatura aditiva (MA) ou impressão 3D, como é conhecida é uma técnica desenvolvida para fabricar objetos com estruturas e geometrias complexas (MAIA, 2023). Ela é caracterizada pela adição sucessiva de materiais, camada por camada, o que a diferencia dos métodos tradicionais de manufatura subtrativa, como a usinagem, onde a peça é obtida a partir da retirada de material (Masood; Song, 2004).

Essa tecnologia tem sido bastante difundida devido a sua praticidade, partes podem ser criadas através de um modelo virtual de objeto a partir de *softwares*, o que traz como vantagem a diminuição da mão de obra, menor tempo de fabricação, custos finais inferiores a outros métodos de fabricação, além de reduzir o desperdício de material e energia. Outro ponto em que se difere da usinagem é o fato de que para a produção de uma única peça por meios convencionais pode-se necessitar de ferramentas específicas e diversos processos, enquanto na manufatura aditiva pode-se obter o mesmo resultado com uma única etapa ou com um número significativamente menor (Rodrigues *et al.*, 2017).

A Fabricação por Material Fundido (FFF) ou como também é conhecida, Modelagem de Deposição Fundida (FDM) é um método dentro da impressão 3D considerado economicamente viável e de fácil manutenção, sendo utilizado industrialmente e

domiciliariamente (Rossetto, [s.d.]). Tal método produz as partes a partir da fundição e extrusão de filamento termoplástico através do bico aquecido do cabeçote da máquina, esse material é depositado camada por camada até que se finalize o processo (Amorim, P. A., 2021; Da Cunha, *et al.*, 2023). É comum nas impressoras 3D que utilizam esse processo, o bico de extrusão se movimentar entre os eixos X e Y, enquanto a mesa de impressão se movimenta ao longo do eixo Z. Ao se produzir as peças em material termoplástico pode-se ter grandes variações em sua propriedade mecânica, isso, porque a resistência apresentada entre as camadas do eixo Z é significativamente menor do que nas regiões do eixo X e Y (Da Cunha *et al.*, 2023).

Um ponto a se observar é que a resistência mecânica não é dada somente pelas características do filamento utilizado no processo FDM, mas é principalmente determinado a partir dos parâmetros de impressão como a velocidade, a orientação e o preenchimento (Harun *et al.*, 2009).

Dentre os biopolímeros existentes no mercado, o PLA é um dos principais polímeros biodegradáveis da categoria devido suas características físicas e mecânicas suficientemente úteis para diversas aplicações que o tornam potenciais substitutos para termoplásticos feitos à base de petróleo. O Poli (ácido láctico) é caracterizado como um termoplástico biodegradável da família dos poliésteres alifáticos derivados de  $\alpha$ -hidroxiácidos, podendo apresentar estrutura semicristalina ou amorfa. Tipicamente advindo de fontes renováveis como amido ou açúcar, este material pode apresentar variação em suas propriedades de acordo com a proporção de enantiômeros opticamente ativos presentes no ácido láctico do qual se obteve o polímero, fato que possibilita a produção de um amplo espectro de polímeros (Pereira & Morales, 2014).

Portanto, entende-se que o PLA pode apresentar diferentes características e propriedades de acordo com as mudanças existentes em sua estrutura molecular, fato que torna este material cada vez mais interessante para a indústria pela vasta gama de possibilidades e aplicações que possui. Além, de apresentar inúmeras vantagens: sua produção consome importante quantidade de dióxido de carbono, é obtido a partir de fontes agrícolas renováveis, é reciclável e compostável, o que compreende ser uma alternativa do ponto de vista ambiental e possível melhoria da economia na área agrícola. Porém, este ainda é um material de estudos que apresenta questões de relativa importância, como a necessidade de melhoria de suas

propriedades físicas e mecânicas, como flexibilidade, resistência ao impacto e processamento através de aditivção (Pereira & Morales, 2014).

Atualmente é a matéria prima mais utilizada globalmente no processo de impressão 3D do tipo FFF, devido as vantagens já citadas anteriormente representando um volume de mercado US\$ 6.395,5 milhões em 2017 e com uma previsão de atingir US\$ 9.905,9 milhões em 2025, crescendo a uma Taxa de Crescimento Anual Composta (CAGR) de 5,3% entre os anos de 2018 e 2025 (Allied Mark. Res., 2018). Isso, demonstra que o volume de polímeros a base biológica crescerá mais rápido do que os polímeros de base fóssil, o que pode ser comprovado através de uma pesquisa realizada pelo Nova Institute, localizado na Alemanha, em que foi analisado que os biopolímeros terão um crescimento notável em relação aos não biológicos (Skoczinski *et al*, 2020).

A Tabela 1 apresenta uma relação comparativa entre as propriedades mecânicas do PLA e outros polímeros comumente utilizados na impressão 3D, o Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) e o Polietileno Tereftalato PETG.

Tabela 1 - Comparativo entre ABS, PETG e PLA

Propriedades	PLA	ABS	PETG
Ecológico	Alto	Baixo	Alto
Brilho	Médio	Baixo	Alto
Transparência	Médio	Baixo	Alto
Rigidez / Dureza	Médio	Alto	Alto
Resistência a Impactos	Baixo	Médio	Alto
Flexibilidade	Baixo	Médio	Médio
Contração / WARP	Baixo	Alto	Médio
Precisão / Detalhes	Alto	Baixo	Médio
Qualidade de Superfície	Alto	Baixo	Alto
Resistência / Atritos	Baixo	Médio	Alto
Resistência Química	Médio	Baixo	Alto
Resistência a Temperatura	Baixo	Alto	Médio
Usinabilidade	Baixo	Alto	Baixo
Densidade	Baixo	Médio	Baixo
Temp. de Impressão	Médio	Alto	Alto
Temp. Mesa Aquecida	Baixo	Alto	Médio
Preço por m <sup>3</sup> / grama / hora	Baixo	Médio	Médio

Fonte: Besko *et al*, 2017

A Tabela 2 mostra os valores médios das propriedades mecânicas de filamentos de PLA comercializados no Brasil e aplicados no processo de impressão 3D FDM.

Tabela 2 - Características mecânicas PLA

Características Mecânicas	PLA	Norma
Tensão de escoamento / Mpa	28,4	ASTMD638
Módulo de elasticidade / Mpa	1896	ASTMD638
Tensão de ruptura / Mpa	46	ASTMD638
Dureza / Shore D	85	ASTMD2240
Alongamento / %	3,69	ASTMD638

Fonte: 3DLAB. Fabricante de Filamentos 3DLab, 2023

Analisando os valores verificou-se que o material com as melhores características para o presente trabalho seria o PLA.

### **Influência dos Parâmetros de Impressão na otimização do uso de matérias primas**

A manufatura aditiva emergiu como uma tecnologia promissora a fim de desenvolver produtos a partir de matérias-primas sustentáveis. Entretanto, a impressão 3D conta com diversos desafios, sendo o principal deles a otimização de seu desempenho. Ou seja, as condições de impressão necessária para se alcançar as propriedades mecânicas, qualidade do objeto e seu acabamento superficial. Desse modo, um dos requisitos chave para a otimização do desempenho são as propriedades do material – resistência à tração, flexão, elasticidade, tensão de ruptura (Subramani *et al*, 2024).

A escolha do material impacta consideravelmente três importantes fatores: tempo de impressão, quantidade de material consumido e o custo. O PLA trabalha de modo proporcional entre velocidade de impressão e custo, entretanto, outro ponto que afeta os parâmetros citados é a densidade da estrutura (Nițuică, Pavel–Mihai *et al*, 2024). Ao aumentar a densidade da peça, o tempo de impressão aumenta na mesma proporção, o que tem por consequência um aumento equivalente no consumo de material e o custo geral (Nițuică, Pavel–Mihai *et al*, 2024).

O processo de FFF permite a fabricação de peças sem que haja a necessidade de possuírem corpos maciços, ou seja, preenchidas com 100% de densidade. Para que a peça seja

impressa sem ser sólida e sem perder a resistência, a heterogeneidade do preenchimento visa suprir as necessidades causadas pelo não preenchimento completo. (Sousa, José Guilherme Queiroz, 2022).

A densidade do corpo de prova é um parâmetro que tem impacto direto no tempo de impressão, na resistência da peça, na quantidade de material utilizado e em seu custo. Trabalhar com maiores densidades significa maior tempo de fabricação, bem como o valor investido (Porsani, 2017).

## Metodologia

### Preparação das amostras via impressão 3D

Neste estudo foi utilizado o filamento de PLA BASIC (Formfutura) sem corante com diâmetro de 1,75 mm. Isso, devido ao fato de o PLA sem pigmentação apresentar melhores propriedades em relação ao PLA colorido (Santana *et al*, 2018). Para a impressão dos corpos de prova, o PLA utilizado foi colocado em uma estufa de modo a retirar a umidade do material.

Para impressão foi definido uma altura de camada de 0,2 mm; uma espessura de parede de 0,8 mm distribuídas em duas camadas; uma espessura de base e topo de 0,9 mm distribuídas em cinco camadas; um preenchimento de 50% em padrão de grade. A temperatura do bico extrusor foi definida em 200°C e a temperatura do prato de impressão em 60°C. Outro ponto determinado foi a velocidade de impressão em 50 mm/s, com a opção de contorno habilitada (*skirt*) e a velocidade do cooler foi aplicada em 100% (Vasconcelos, 2025).

De acordo com a Simplify 3D (2023) a temperatura de impressão deve variar entre 190 e 220°C, porém Hadmod e Andersson (2015) indicam de 160 a 220°C. Já para a mesa de impressão, o primeiro indica que se trabalhe com uma temperatura em torno de 45 a 60°C. Entretanto, Hadmod e Andersson (2015) conferem um valor de 70°C.

Os corpos de prova foram desenhados no programa AutoCad e modelados para impressão no Cura, conforme processado, estudado e detalhado, em Vasconcelos, 2025. Para imprimir foi empregada a impressora Anet A8 plus V1, a qual consiste em uma estação de trabalho móvel que a partir de filamentos plásticos e linhas de programação em código G, produz as peças necessárias.

Com o objetivo de analisar o comportamento do PLA a partir de padrões heterogêneos de preenchimento, ou seja, corpos de prova desenvolvido com 50% de densidade e amostras com 50/10%, onde seu centro possui 50% de densidade e as laterais, 10%. Foram desenvolvidos vinte corpos de provas, sendo dez de tração e dez de flexão, na qual as dimensões dos corpos de provas de tração seguiram a norma ASTM D638 (método de ensaio padrão que visa determinar as propriedades de tração de plásticos), enquanto para o ensaio de flexão foi utilizada a norma ASTM D790 (métodos de ensaios para determinar as propriedades de flexão de materiais plásticos).

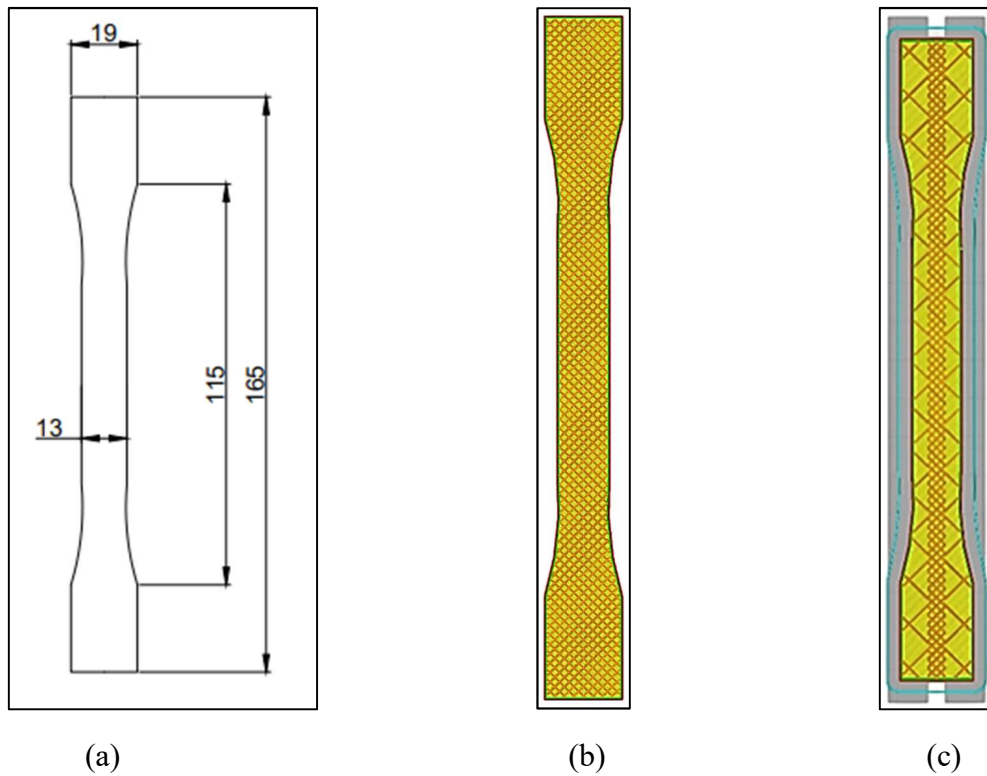
### **Dimensionais e Padrões de preenchimento**

Para os testes foram impressos vinte corpos de prova, dos quais dez foram utilizados para o ensaio de tração e dez para o de flexão. Sendo esses ainda divididos em dois grupos, onde são cinco com um preenchimento total de 50% e outros cinco que foram preenchidos com 50% em seu centro e 10% em suas laterais.

A Figura 1 apresenta o dimensional utilizado para as amostras do ensaio de tração, com base na norma ASTM D638, bem como uma imagem com variação dos padrões de preenchimento utilizados. Os corpos de prova apresentam 3,2 mm de espessura, 165 mm de comprimento total, 115 mm de comprimento útil, 19 mm de largura e 13 mm de largura útil, como demonstrado.



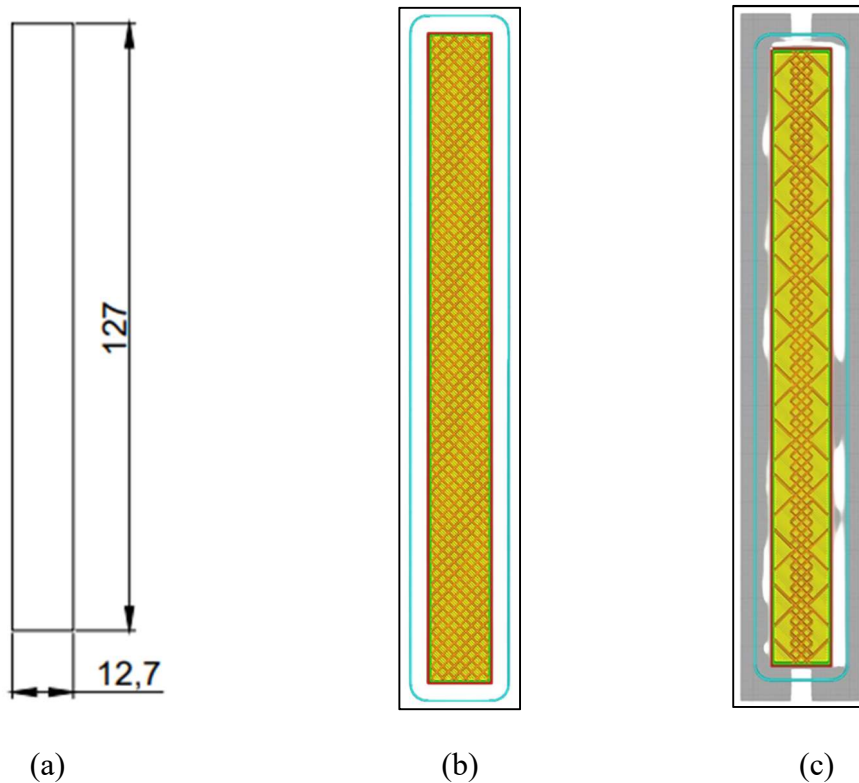
Figura 1 – Amostras para ensaio de tração (a) Representação em AutoCad (b) padrão de preenchimento de homogêneo (c) padrão de preenchimento heterogêneo 50-10%



Fonte: Adaptado de Vasconcelos, 2025

Adotando a norma ASTM D790, as amostras do ensaio de flexão foram dimensionadas com 3,2 mm de espessura, 12,7 mm de largura e 127 mm de comprimento, como mostra a Figura 2.

Figura 2 - Representação em AutoCad Corpo de Prova Flexão (a) Representação em AutoCad (b) padrão de preenchimento de homogêneo (c) padrão de preenchimento heterogêneo 50-10%



Fonte: Adaptado de Vasconcelos, 2025

### Detalhes de elaboração dos padrões de preenchimento

A variação de preenchimento dos corpos de prova, foi realizada dentro da plataforma Cura e definida uma zona em que seria aplicada a mudança da porcentagem de preenchimentos. Para as zonas selecionadas a serem impressas com variação de preenchimento os parâmetros foram os mesmos, exceto pela espessura da parede, base e topo que foram zerados.

A principal característica alterada foi a porcentagem de preenchimento modificada para 10%, onde os corpos de prova passaram a ter em seu centro, com oito milímetros de largura, um preenchimento de 50% e em suas laterais com 10%.

### Ensaio Mecânico de Tração

Para o ensaio de tração foi utilizada a Máquina de Ensaio Universais Eletromecânica AGX-V da empresa Shimadzu, com dispositivo de fixação por cunha e foi utilizada uma célula de carga de 5kN. O ensaio foi feito conforme norma D638 para corpos de prova de material polimérico, velocidade de ensaio 5mm/min e temperatura ambiente de 20°C. A Figura 3 (a) apresenta o equipamento utilizado, enquanto a Figura 3 (b) exhibe um corpo de prova de tração afixado em seu devido suporte.

Figura 3 – (a) Máquina universal de ensaios (b) dispositivo de fixação por cunha com corpo de prova posicionado para ensaio de tração.



(a)



(b)

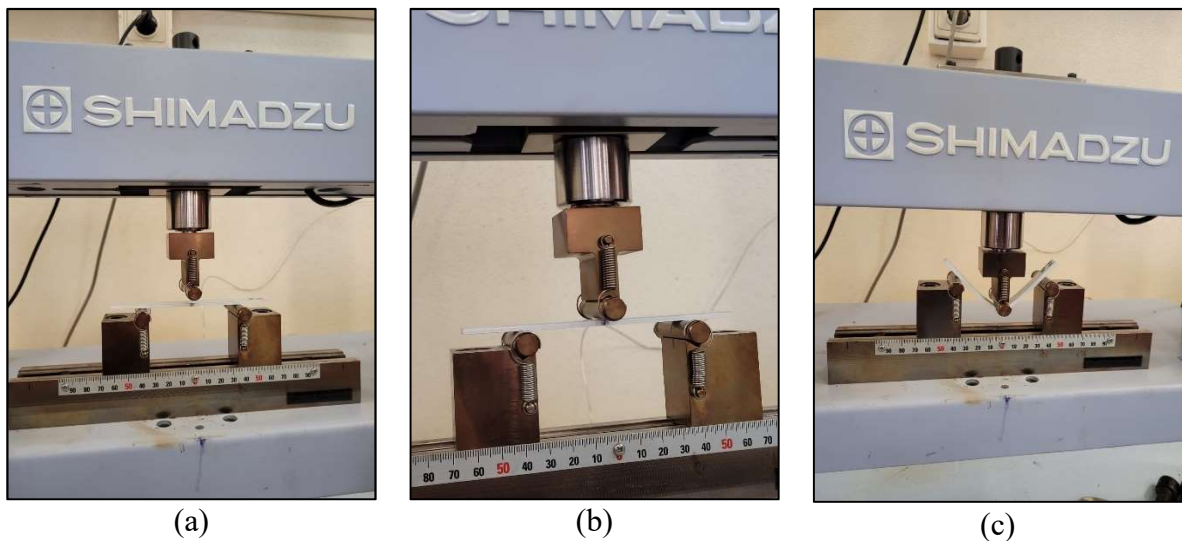
Fonte: Autoria própria, 2025

### Ensaio Mecânico de Flexão

Para o teste de flexão foi utilizada a mesma Máquina de Ensaio Universais Eletromecânica AGX-V da empresa Shimadzu com uma célula de carga de 5kN, porém com um dispositivo de fixação com três pontos, onde a barra retangular tem suas extremidades apoiadas nos suportes laterais. O ensaio foi feito conforme norma D790 uma velocidade de ensaio de aproximadamente 3 mm/min, flecha máxima definida em 30 mm, temperatura ambiente de 20°C. Após ser posicionada, a amostra passa a sofrer um esforço crescente na região central. As etapas do ensaio são exemplificadas pela Figura 4 onde é possível visualizar

o dispositivo utilizado em (a) no posicionamento do corpo de prova, (b) no início do ensaio, e (c) na finalização do ensaio.

Figura 4 – Ensaio de Flexão (a) Posicionamento do corpo de prova (b) Início do Ensaio (c) Final do ensaio



Fonte: Autoria própria, 2025

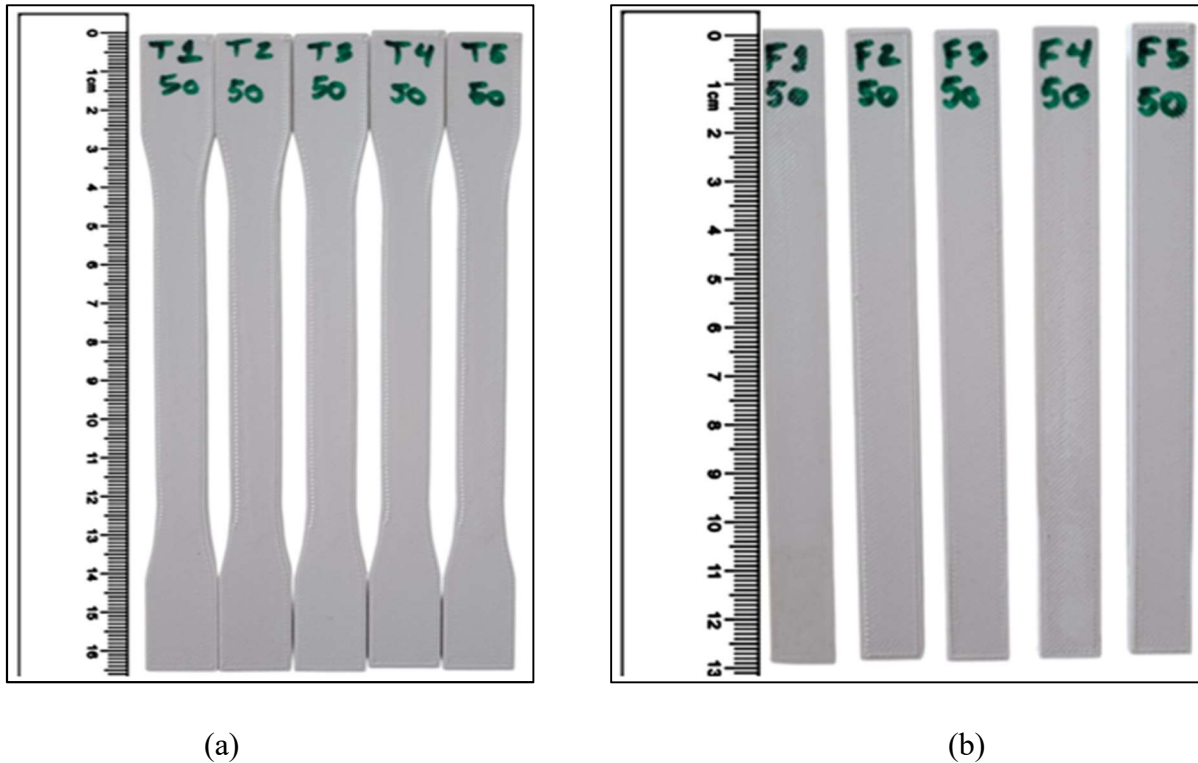
Todos os procedimentos desde a caracterização, desenvolvimento, produção das amostras e ensaios mecânicos foram realizados no FabLab e Laboratório de Ensaios Mecânicos no Instituto Politécnico de Bragança (IPB).

## Resultados

### Produção das amostras

As amostras foram nomeadas como T50 e F50, referentes aos corpos de prova de tração e flexão, respectivamente, com preenchimento homogêneo de 50% com padrão de grade, enquanto as amostras T50-10 e F50-10 são referentes aos corpos de prova, também tração e flexão respectivamente, com preenchimento heterogêneo sendo parcialmente 50% e parcialmente 10%. A Figura 5 (a) apresenta as amostras impressas para ensaio de tração e a Figura 5 (b) as amostras preparadas para o teste de flexão.

Figura 5 – Corpos de prova (a) Tração (b) Flexão



Fonte: Autoria própria, 2025

Após impressos, todos os corpos de provas foram identificados e medidos com paquímetro a 20°C, de maneira a analisar se possuíam as mesmas medidas. Os valores do material de impressão gastos foram calculados por meio do *software* UltiMaker Cura, mesmo utilizado para o *fatiamento*, e são visíveis na Tabela 3.

Tabela 3- Quantidade de material utilizado na impressão das amostras

Amostra	Tipo de preenchimento	Material gasto (g)	Material gasto (m)
T50	Grade 50%	8,5	2,85
T50-10	Grade 50% / 10%	7,7	2,6
F50	Grade 50%	5,5	1,84
F50-10	Grade 50% / 10%	5,1	1,69

Fonte: Autoria própria, 2025

Ao comparar as amostras de tração verifica-se uma redução de 0,80 gramas de PLA para a amostra T50-10, que equivale a uma redução de aproximadamente 9,4% em massa. Ao analisarmos em questão do comprimento isso equivale a um decréscimo próximo a 8,8% passando de 2,85 metros gastos para 2,60 metros. A mesma comparação é feita com as amostras de flexão que apresentam uma diferença de 0,40 gramas na massa de matéria-prima gasta para a F50-10, implicando na diminuição aproximada de 7,3%, para o comprimento esse valor se torna cerca de 8,2% ao passar de 1,84 metros para 1,69 metros.

Foram coletados os dados dos tempos de impressão de cada etapa para cada variação dos corpos de prova a fim de comparar alterações decorrentes da variação de preenchimento. Na Tabela 4 pode ser visto o tempo para a etapa de *preenchimento*. Essa etapa equivale a estrutura interna da peça impressa que proporciona estrutura e resistência a mesma, é também a etapa afetada pela heterogeneidade do preenchimento. Já o preenchimento da *parede interna* forma a estrutura interna da casca do impresso, ajudando a dar forma a estrutura. As *paredes externas* funcionam com o mesmo propósito, mas formam a superfície visível do objeto. *Retrações* são movimentos realizados ao longo da impressão para evitar o vazamento do material enquanto o bico se movimenta sem estar expelindo material. *Superfície externa* são as camadas superiores e inferiores do material. *Saia* é o primeiro “desenho” executado pela impressora ao redor do objeto sem tocá-lo, esse processo funciona para verificar o nivelamento da cama de impressão assim como garantir uma saída uniforme de material. E, por fim os *deslocamentos* são os movimentos realizados enquanto não se está extrudando material.

Tabela 4- Tempos de impressão

Amostra	Preenchimento (min)	Paredes internas (min)	Paredes externas (min)	Retrações (min)	Superfície externa (min)	Saia (min)	Deslocamento (min)	Tempo total (min)
T50	00:04	00:03	00:03	00:01	00:39	00:00	00:03	00:56
T50-10	00:03	00:03	00:03	00:01	00:39	00:00	00:03	00:55
F50	00:03	00:02	00:02	00:00	00:24	00:00	00:02	00:36
F50-10	00:02	00:02	00:02	00:00	00:24	00:00	00:02	00:35

Fonte: Autoria própria, 2025

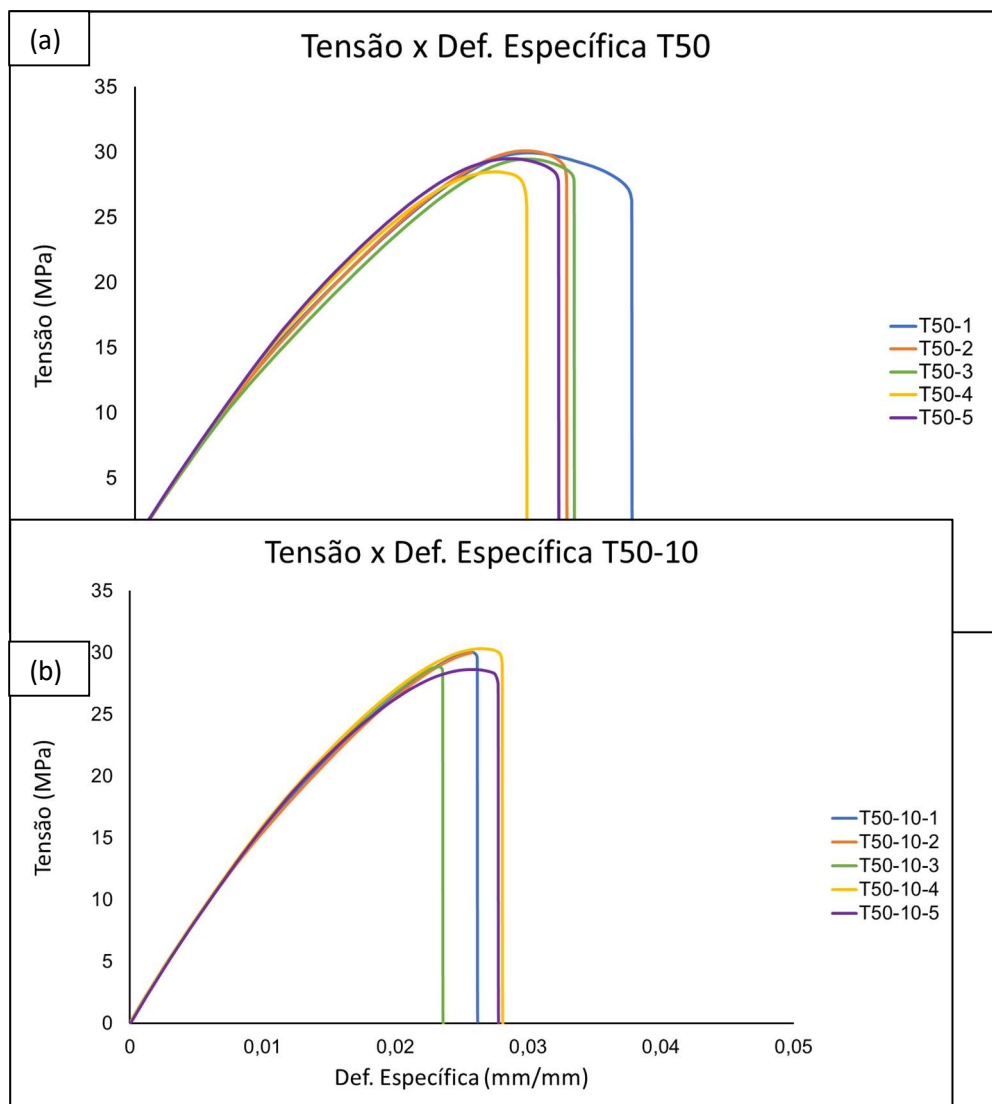
Todos os tempos são fornecidos pelo próprio programa de fatiamento, no caso UltiMaker Cura, e são computados em minutos, dessa forma temos uma comparação aproximada dos tempos de impressão das peças homogêneas e heterogêneas. Seja entre as

amostras de tração ou entre as amostras de flexão existe uma redução no tempo de impressão, sendo o tempo menor visível nos corpos de prova com preenchimento heterogêneo e decorrentes da etapa de *preenchimento*.

### Propriedades Mecânicas: Ensaio de Tração

A Figura 6 (a) demonstra as curvas médias de tensão x deformação específica para os corpos de prova com preenchimento total de 50%. A Figura 5 (b) mostra o mesmo ensaio realizado, porém com os corpos de prova heterogêneos 50-10%.

Figura 6 - Curva Tensão x Deformação para as amostras submetidas a ensaio de tração (a) T50 (b) T50-10



Fonte: Autoria própria, 2025

A partir das curvas foram calculados os valores médios e desvio padrão para as propriedades: força máxima, força de escoamento, tensão máxima, tensão de escoamento, deformação máxima e tensão na ruptura. Esses valores são apresentados na Tabela 5, para as amostras com diferentes padrões de preenchimento.

Tabela 5 – Comparação das propriedades mecânicas sob tração das amostras com diferentes padrões de preenchimento

Média	Força Máxima (N)	Força de Escoamento 0,2% (N)	Tensão Máxima (MPa)	Deslocamento máximo da deformação (%)	Tensão na ruptura (MPa)
T50	1227,57 ± 26,18	764,43 ± 49,25	29,51 ± 0,63	2,62 ± 0,09	27,50 ± 0,88
T50-10	1226,31 ± 30,35	786,27 ± 37,82	29,48 ± 0,73	2,53 ± 0,13	28,95 ± 0,79

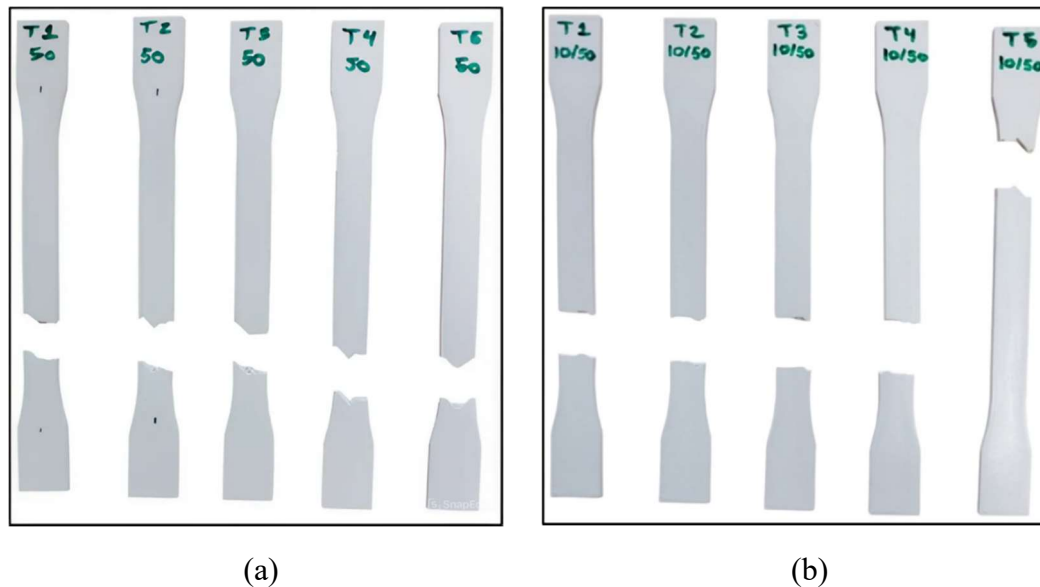
Fonte: Autoria própria, 2025

Os resultados se mostraram muito próximos entre as duas variações submetidas a esforços de tração com uma redução de apenas 0,1% na tensão máxima suportada para os corpos de prova heterogêneos, os valores de tensão de escoamento (0,2%) e tensão na ruptura, porém se mostraram maiores nas amostras mistas com resultados de 18,90 MPa e 28,95 MPa enquanto os corpos de prova homogêneos tiveram valores de 18,38 MPa e 27,50 MPa.

Um importante aspecto observado durante os ensaios diz respeito a característica de rompimento dos corpos de prova. Os materiais configurados com 50% de preenchimento sofreram a fratura em pontos mais próximos a extremidade de sua estrutura, rompendo de maneira abrupta e não linear (Figura 7(a)). Em contrapartida as amostras preenchidas com 10% apresentaram um padrão de fratura com características mais lineares (Figura 7(b)). Porém, ambos os grupos romperam próximo ao raio do filete, isso porque, esta é uma região em que ocorre maior concentração de tensão, comportamento característicos de corpos de provas impressas a partir do modo FDM (Massod, 2010).



Figura 7 - Amostras ensaiadas – Tração (a) Preenchimento homogêneo (b) Preenchimento heterogêneo



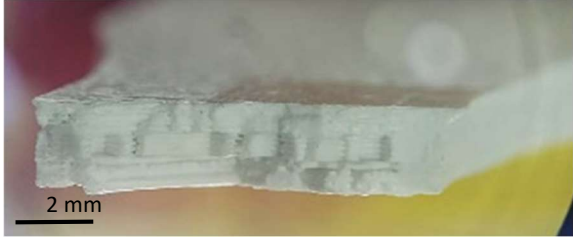


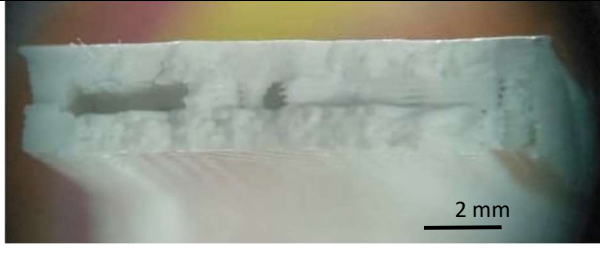

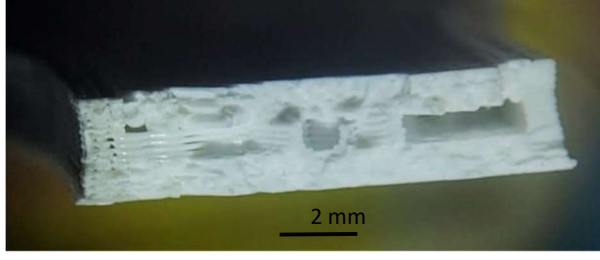




Fonte: Autoria própria, 2025

Com o auxílio de uma lupa foi possível analisar os aspectos da fratura no interior de cada amostra, além de observar a disposição entre as camadas. A Tabela 6 apresenta as imagens das superfícies de fratura de cada corpo de prova, a direita com padrões heterogêneos de preenchimento e a esquerda com padrão homogêneo de 50%.

Ao analisar as imagens pela lupa comprova-se que os corpos de prova com preenchimento de 50% apresentaram um padrão de ruptura aleatório, próximo a curvatura de base, porém de forma irregular e com regiões com ângulos de 45°. Enquanto as amostras com 10% de preenchimento nas laterais apresentaram um padrão mais regular entre si, com fratura linear de aproximadamente 90° em relação ao comprimento útil dos corpos de prova.

Tabela 6– Imagens das Superfícies de fratura dos corpos de prova

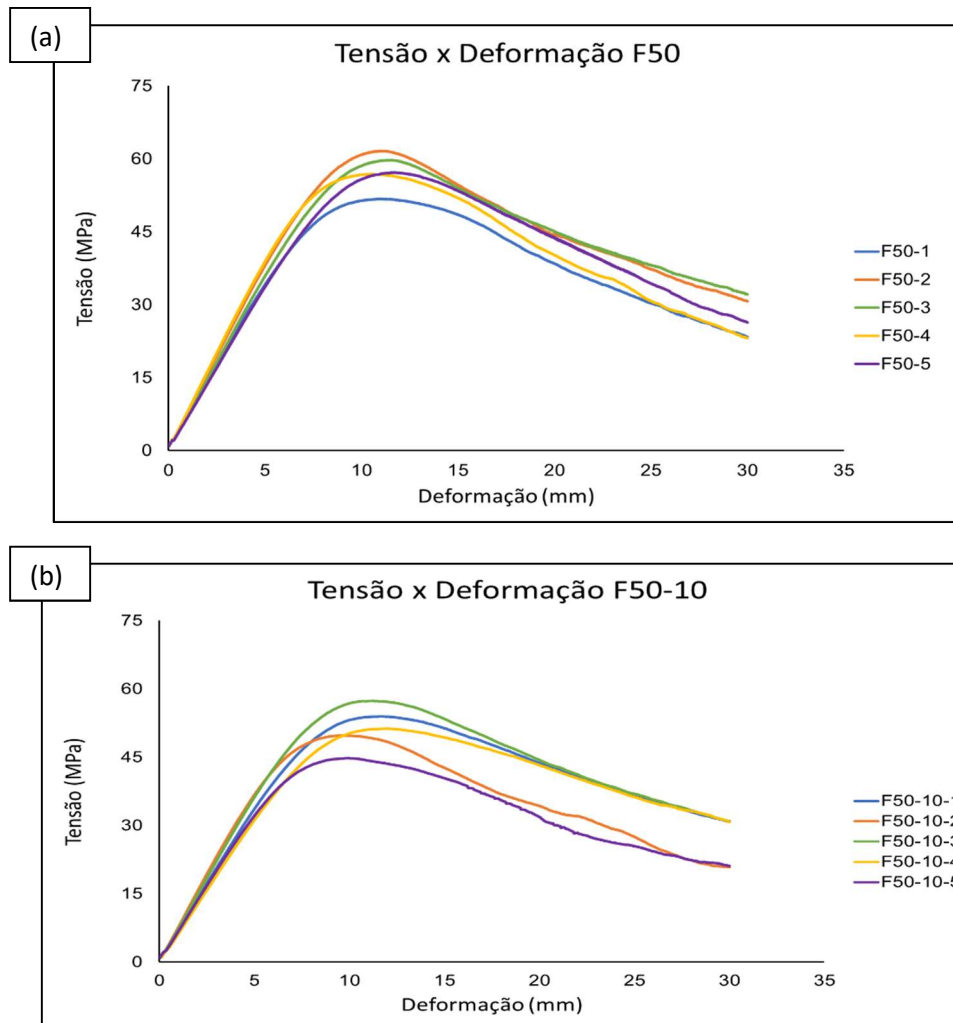
Padrão homogêneo de preenchimento (T50)	Padrão heterogêneo de preenchimento (T50-10)
 <p>T1 – 50%</p>	 <p>T1 – 50-10%</p>
 <p>T2-50%</p>	 <p>T2 – 50-10%</p>
 <p>T3-50%</p>	 <p>T3 -50-10%</p>
 <p>T4-50%</p>	 <p>T4 – 50-10%</p>
 <p>T5-50%</p>	 <p>T5 – 50-10%</p>

50:1

### Ensaio de Flexão

Foram realizados ensaios de flexão com amostras homogêneas e as amostras heterogêneas, assim como nos ensaios de tração. Para realizar os testes de flexão foi estabelecido como padrão um limite de deslocamento de 30 mm, respeitando o limite do equipamento, de maneira a delimitar o fim dos testes já que os corpos de prova não apresentaram ruptura completa. As curvas médias de tensão x deformação pode ser vista na Figura 8 (a) para os corpos de prova com preenchimento total de F50 e 8 (b) para os corpos de prova com preenchimento heterogêneo F50-10.

Figura 8 - Curva Tensão x Deformação para as amostras submetidas a ensaio de flexão (a) F50 (b) F50-10



Fonte: Autoria própria, 2025

A partir das curvas foram calculados os valores médios e desvio padrão para as propriedades: força máxima, força de escoamento, tensão máxima, tensão de escoamento, deformação máxima e tensão na ruptura. Esses valores são apresentados na Tabela 7, para as amostras com diferentes padrões de preenchimento.

Tabela 7 – Comparação das propriedades mecânicas sob flexão das amostras com diferentes padrões de preenchimento

Média	Força Máxima (N)	Força de Escoamento 0,2% (N)	Tensão Máxima (MPa)	Deslocamento máximo da deformação (%)
F50	67,74 ± 4,19	60,16 ± 6,47	4961,98 ± 3913,19	2,11 ± 1,32
F50-10	57,97 ± 4,30	56,62 ± 5,14	6695,91 ± 611,67	1,1 ± 0,11

Fonte: Autoria própria, 2025

Tais quais os resultados de tração, os valores para flexão também se mostraram próximos, porém, com uma diferença mais notável entre as variações de preenchimento. Os corpos de prova homogêneo apresentaram uma tensão máxima de 4961,98 MPa, enquanto que os corpos de prova heterogêneos de 6695,91 MPa, resultando em uma redução de aproximadamente 10,5% em sua tensão.

Através de todos os dados apresentados, pode-se concluir que nos ensaios de tração a diferença se mostrou muito pequena com os corpos de prova homogêneos superando os valores de tração máximos médios em apenas 0,03 MPa. Nota-se também que os corpos de prova mistos romperam de forma praticamente linear e acima da curvatura final, diferente dos corpos de prova com 50% de densidade que não mantiveram um padrão e romperam de modo abrupto.

Faz-se válida a observação de que a realização dos ensaios de tração e flexão possam trazer resultados comparativos mais adequados, vez que as amostras mostraram um valor elevado de deformação.

### **Análise de variância (ANOVA)**

Utilizando o *software* RStudio foi possível realizar o cálculo estatístico ANOVA para avaliar se existem diferenças significativas entre os resultados encontrados nos ensaios de tração e flexão. A ANOVA tem como objetivo comparar a variabilidade dentro dos grupos e entre os grupos, de modo a analisar as diferenças entre as médias.

Foi definido um nível de confiança de 95%, de maneira bilateral, e a partir da avaliação de cada variável foi estabelecido que valores em que o p-valores (resultado gerado pelo software ao calcular os testes e pressupostos necessários para a análise) fosse superior ou igual ao valor alfa ( $\alpha = 0.05$ ) seriam considerados aprovados.

Dessa maneira, foram realizados testes que comprovassem estatisticamente que as amostras possuem resultados similares, no quesito tensão máxima.

Para realizar a ANOVA foi necessário primeiro verificar se os dados poderiam ser utilizados. Desse modo, para o ensaio de tração, foi verificado a normalidade da amostra, onde obteve-se um p-valor para os corpos de prova de 50% de 0,3343 e para o de 50-10% de 0,6064, concluindo que ambos são maiores que 0,05. Para o ensaio de flexão, teve-se para as amostras homogêneas um p-valor de 0,7227, enquanto para os corpos de prova heterogêneos 0,9867.

A segunda avaliação realizada para verificar foi o teste de correlação de Pearson, onde foi encontrado um p-valor de 0,6188, para as amostras de tração e 0,8905 para flexão. Esses resultados comprovam estatisticamente que as amostras são de fato independentes, o que permitiu realizar a ANOVA.

Com isso, foi verificado os seguintes pressupostos, o de diferença entre as médias dos resíduos que apresentou um p-valor de 0,946 para tração e 0,0555 para flexão, o que comprova que os resíduos não possuem diferenças entre as suas médias. O último pressuposto analisado foi o da homoscedasticidade das variâncias, que avalia se as variâncias das amostras são iguais, desse modo, obteve-se um p-valor de 0,7805 para tração e 0,6611 para flexão, comprovando que as variâncias amostrais são iguais.

A partir dos resultados de ambos os pressupostos, pode-se concluir que há evidências de que as medidas analisadas de tensão máxima dos corpos de prova com 50% de preenchimento são iguais às medidas das amostras preenchidas com 50-10%.

### **Considerações Finais**

A análise da influência na variação dos parâmetros de impressão 3D, utilizando modos heterogêneos de preenchimento, nas propriedades mecânicas do PLA foi verificada no presente estudo. Os resultados obtidos evidenciaram que a variação no preenchimento não possui influência nas propriedades de resistência à tração e flexão, permitindo que seja realizada a

redução da densidade estrutural sem que haja perdas na resistência mecânica. Além, ao se trabalhar com altas taxas de preenchimento há um aumento correspondente no tempo de impressão em 01 minuto por peça e na massa das peças, o que por consequência pode vir a gerar um aumento no custo. Isso, demonstra como o preenchimento interfere em todas as etapas do processo de impressão 3D.

Analisando os valores apresentados pela ANOVA, verifica-se estatisticamente que os dois modelos de amostras não possuem diferenças entre os seus valores, permitindo, dessa maneira, concluir que os resultados apresentados são iguais.

Comparando ao limitado número de pesquisas relacionadas a preenchimentos heterogêneos o resultado do trabalho se mostrou satisfatório para com o intuito que era avaliar a viabilidade de se trabalhar com peças heterogêneas com menores preenchimentos, o que contribui para menores custos com material, produção, energia e tempo de impressão.

Ademais espera-se que este colabore na formação de uma base de dados para pesquisas sobre o tema no futuro, a coleta e análise de novos dados proporcionará uma compreensão mais profunda e detalhada, possibilitando que outros pesquisadores identifiquem padrões, tendências e correlações que ainda não foram exploradas. Além disso, aspira-se que a disponibilização desses dados promova avanços teóricos e práticos que beneficiem a área como um todo contribuindo para validação de hipóteses que possam surgir.

### **Agradecimentos**

Ao Instituto Politécnico de Bragança - Portugal, pela possibilidade de intercâmbio de graduação e disponibilização dos laboratórios para realização das análises mecânicas. Ao Prof. Me. Jorge Henrique de Carvalho dos Santos, pela ideiação do projeto de trabalho de conclusão de curso, dando todo suporte durante a estadia da autora em Portugal.

### **Bibliografia**

AMORIM, Paulo Alexandre. **Síntese de  $\beta$ -TCP e estudo da influência da incorporação de  $\beta$ -TCP em microcompósitos de PLA preparados por Extrusão de Dupla Rosca e Moldagem por Injeção**, 2015.

ASTM SUBCOMMITTEE D20. 10 ON MECHANICAL PROPERTIES. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.

BRANCO, Rodolfo Ramos Castelo et al. **Caracterização da performance do material Poliacido Láctico (PLA) manufaturado pela tecnologia de Modelagem de Fusão e Deposição (FDM)**. Research, Society and Development, v. 10, n. 8, p. e44210817348-e44210817348, 2021.

BESKO, Marcos; BILYK, Claudio; SIEBEN, Priscila Gritten. **Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D**. Gestão Tecnologia e Inovação, 2017, 1.3: 9-18.

BRISCHETTO, Salvatore; MAGGIORE, Paolo; FERRO, Carlo Giovanni. Special Issue on “**Additive Manufacturing Technologies and Applications**”. Technologies, 2017, 5.3: 58.

DA CUNHA, Rafael Braga, et al. **Toughening and shape memory effect on PLA/copolymers blends produced by simultaneous dynamic vulcanization and reactive compatibilization**. Shape Memory and Superelasticity, 2023, 9.4: 601-606.

HARUN, W. S. W., et al. **Characteristic studies of collapsibility of ABS patterns produced from FDM for investment casting**. Materials Research Innovations, 2009, 13.3: 340-343.

MAIA, Lucas Felipe Aguiar. **Análise da influência dos parâmetros de impressão 3D nas propriedades mecânicas do PETG utilizando método de taguchi**. 2023.

MASOOD, Syed H.; SONG, Wei Q. **Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using fused deposition modelling**. Materials & design, 2004, 25.7: 587-594.

NIȚUICĂ, Pavel-Mihai et al. **Parameter optimization for efficient 3d printing of biomodels**. acta technica napocensis. Series: applied mathematics, mechanics, and engineering, v. 67, n. 1s, 2024.

PEREIRA, Renato Brisigueli; MORALES, Ana Rita. **Estudo do comportamento térmico e mecânico do PLA modificado com aditivo nucleante e modificador de impacto**. Polímeros, 2014, 24: 198-202.

PORSANI, Rodolfo Nucci, Silva, Bruno Borges, & Hellmeister, Luiz Antônio Vasques (2017). **Revisão teórica da história da manufatura aditiva e das propriedades dos principais insumos e estruturas de preenchimento nas impressoras 3D FDM open material**. Joinville: II congresso internacional Design Materials.

RAJAN, Kumaresan, et al. **Fused deposition modeling: process, materials, parameters, properties, and applications**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 120.3: 1531-1570.

RODRIGUES, Vinícius Picanço, et al. **Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações**. Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas, 2017, 12.3: 1-1.

ROSSETTO, Hebert Luís. **Contribuições para a ciência e engenharia de materiais cimentícios: processamento, durabilidade e resistência mecânica.** 2007. PhD Thesis. Universidade de São Paulo.

SANTANA, Leonardo, ALVES, Jorge, NETTO, Aurélio, MERLINI, Claudia. **A comparative study between PETG and PLA for 3D Printing through thermal, chemical and mechanical characterization.** Revista Matéria, v. 23, n. 4, 2018

SOUSA, José Guilherme Queiroz. **Efeito dos parâmetros de impressão 3D na resistência à tração de peças impressas com filamento ABS.** 2022.

SUBRAMANI, Raja et al. **Exploring the use of Biodegradable Polymer Materials in Sustainable 3D Printing.** Applied Chemical Engineering, p. 3870-3870, 2024.

VASCONCELOS, Gabriel Gineis; NOSSA, Tamires de Souza. **Análise do método heterogêneo de preenchimento para impressão 3D.** Revista Brasileira de Iniciação Científica, 2025. (Submetido para publicação).