



REVISTA BRASILEIRA DE MECATRÔNICA
FACULDADE SENAI DE TECNOLOGIA MECATRÔNICA

COMPARAÇÃO ENTRE DADOS EXPERIMENTAIS E ESPECIFICAÇÕES DE PLA COM GRAFENO NA IMPRESSÃO 3D

COMPARISON BETWEEN EXPERIMENTAL DATA AND SPECIFICATIONS OF PLA WITH GRAPHENE IN 3D PRINTING

Willian Leonardo dos Santos^{1, i}
Edgard Gonçalves Cardoso^{2, ii}
Leandro Cardoso da Silva^{3, iii}
Lucas Almeida Willenshofer^{4, iv}
Manuel Patricio da Silva Bisneto^{5, v}

Data de submissão: (27/05/2025) Data de aprovação: (06/05/2026)

RESUMO

Este trabalho analisou o comportamento mecânico de corpos de prova fabricados em impressão 3D utilizando poli (ácido) láctico (PLA) com 10% de grafeno, por meio do processo *Fused Deposition Modeling* (FDM). Foram produzidas amostras com variações na espessura de camada de 0,1, 0,2 e 0,3 mm, no padrão e no percentual de preenchimento sendo 10, 50 e 95% (honeycomb e *rectilinear*). Os resultados mostraram que determinadas condições superaram os dados fornecidos pelo fabricante, atingindo até 70% a mais de resistência à ruptura do que os 28,72 MPa declarados. O preenchimento reticulado, com espessura de camada reduzida 0,1 mm e 95% de *infill*, apresentou o melhor desempenho. A pesquisa evidenciou que a otimização dos parâmetros de impressão tem impacto direto nas propriedades mecânicas do material.

Palavras-chave: impressão 3D; PLA com grafeno; ensaio de tração; FDM; propriedades mecânicas.

¹ Pós-graduado no Centro Universitário SENAI-SP – Campus Brás. E-mail: willian.leonardosantos@gmail.com

² Professor de Educação Superior no Centro Universitário SENAI-SP – Campus Brás. E-mail: edgard.cardoso@sp.senai.br

³ Professor de Educação Superior no Centro Universitário SENAI-SP – Campus Brás. E-mail: leandro.cardoso@sp.senai.br

⁴ Professor de Educação Superior no Centro Universitário SENAI-SP – Campus Brás. E-mail: lucas.willenshofer@sp.senai.br

⁵ Professor de Educação Superior no Centro Universitário SENAI-SP – Campus Brás. E-mail: manuel.bisneto@sp.senai.br

ABSTRACT

This work analyzed the mechanical behavior of specimens manufactured using 3D printing with polylactic acid (PLA) and 10% graphene, through the Fused Deposition Modeling (FDM) process. Samples were produced with variations in layer thickness of 0.1, 0.2, and 0.3 mm, and in the infill pattern and percentage, being 10, 50, and 95% (honeycomb and rectilinear). The results showed that certain conditions surpassed the data provided by the manufacturer, reaching up to 70% more tensile strength than the 28.72 MPa declared. The rectilinear infill, with a reduced layer thickness of 0.1 mm and 95% infill, showed the best performance. The research evidenced that optimizing the printing parameters has a direct impact on the mechanical properties of the material.

Keywords: 3D printing; graphene-reinforced PLA; tensile testing; FDM; mechanical properties.

1 INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D, representa uma das tecnologias mais disruptivas da atualidade, por possibilitar a produção direta de objetos físicos a partir de modelos digitais com elevado grau de personalização, precisão e economia de recursos. Dentre as tecnologias mais utilizadas no campo da impressão 3D, destaca-se o processo de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM - *Fused Deposition Modeling*), devido à sua acessibilidade e versatilidade no uso de materiais termoplásticos.

O ácido polilático (PLA), um polímero biodegradável e derivado de fontes renováveis, e é bastante usado em impressoras FDM por apresentar boa processabilidade, rigidez e baixa toxicidade (Camargo *et al.*, 2019). Porém o mesmo PLA possui algumas limitações mecânicas e térmicas, as quais restringem sua aplicação em contextos funcionais mais exigentes. Vieira Segundo e Vilar (2016), em suas pesquisas, apresentaram investigações recentes que têm buscado aprimorar suas propriedades por meio da adição de cargas funcionais, como o grafeno, um nanomaterial com elevada resistência mecânica, condutividade térmica e elétrica.

Chacón *et al.* (2017) demonstraram que as propriedades mecânicas de peças de PLA produzidas por FDM são fortemente influenciadas pelos parâmetros de manufatura, como altura de camada, orientação de impressão, densidade e padrão de preenchimento. Os autores destacam que a adequada seleção desses parâmetros é fundamental para otimizar o desempenho estrutural das peças, permitindo obter melhores resultados de resistência e rigidez sem a necessidade de modificar a composição do material.

Segundo Ishfaq *et al.* (2026), os compósitos de PLA reforçados com grafeno apresentam potencial para aplicações de alto desempenho, uma vez que a incorporação desse nanomaterial pode aumentar significativamente a resistência mecânica e a condutividade elétrica das peças produzidas por FDM. Os autores destacam que a relação entre os parâmetros de processamento e a dispersão do grafeno exerce papel decisivo nas propriedades finais do material.

1.1 Problema de pesquisa

A análise do comportamento mecânico de compósitos poliméricos produzidos por impressão 3D ainda enfrenta desafios metodológicos, especialmente na interpretação precisa das curvas tensão-deformação, quando são consideradas variáveis como o tipo de preenchimento e a adição de cargas funcionais ao filamento. O problema de estudo deste trabalho reside na dificuldade de representar graficamente, de forma clara e confiável, as variações de desempenho mecânico de amostras de PLA com grafeno, frente às diferentes configurações de impressão e padrões de *infill* (preenchimento) adotados.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo avaliar experimentalmente o comportamento mecânico de corpos de prova em PLA com adição de 10% de grafeno, produzidos por tecnologia FDM, submetidos a ensaios de tração conforme a norma ASTM D638 (ASTM, 2022). Busca-se, especificamente, identificar a influência dos padrões e percentuais de preenchimento interno (*infill*) sobre parâmetros como resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação.

1.3 Justificativa

O avanço das tecnologias de manufatura aditiva tem impulsionado a busca por materiais com maior desempenho mecânico e térmico, especialmente para aplicações funcionais e industriais. O uso de PLA reforçado com grafeno destaca-se como uma alternativa promissora ao combinar a biodegradabilidade do polímero com o reforço estrutural conferido pelo nanomaterial (Camargo *et al.*, 2019; Liensenfeld, 2023).

Contudo, as especificações técnicas fornecidas pelos fabricantes nem sempre contemplam as variáveis críticas do processo de impressão, como o padrão de preenchimento e a espessura das camadas, o que pode impactar diretamente as propriedades da peça final (Aliheidari *et al.*, 2017). Nesse contexto, a realização de ensaios mecânicos normatizados é essencial para validar as propriedades declaradas e orientar decisões de projeto mais confiáveis (Canevarolo Júnior, 2013; Callister, 2002).

Além disso, a pesquisa contribui para a compreensão da interação entre parâmetros de impressão e desempenho estrutural, promovendo a aplicação segura e eficiente de compósitos de PLA/grafeno na prototipagem funcional, educação tecnológica e desenvolvimento de novos produtos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O desenvolvimento e a disseminação da manufatura aditiva (AM), comumente chamada de impressão 3D, têm revolucionado a forma de projetar, fabricar e consumir objetos. Segundo Kamran e Saxena (2016), essa tecnologia caracteriza-se pela construção de peças tridimensionais por meio da adição sucessiva de camadas de material, o que a diferencia dos processos convencionais subtrativos, como usinagem e moldagem. A origem da impressão

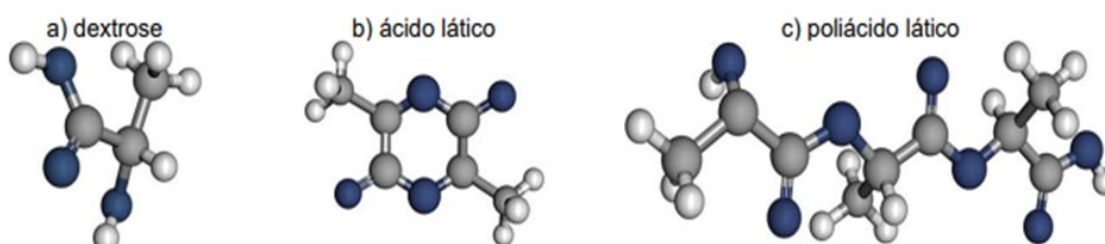
3D remonta aos anos 1980, quando Charles Hull desenvolveu o processo de estereolitografia (SLA), fundamentado na solidificação de resinas fotossensíveis. então, diversas técnicas foram criadas, como o *Fused Deposition Modeling* (FDM) e o *Selective Laser Sintering* (SLS), cada qual com características específicas de resolução, velocidade e compatibilidade com materiais (Gokhare; Raut; Shinde, 2017). Como afirma Shamaas (2022), a expansão dessa tecnologia foi impulsionada pela democratização dos equipamentos, cujo custo tem caído significativamente desde a década de 2010.

Com base em estudo de Fenollosa *et al.* (2021), observa-se que, embora a maioria das impressoras ainda trabalhe com materiais únicos, pesquisas mais recentes vêm explorando a impressão multimaterial, sobretudo com extrusão de polímeros e sistemas híbridos de deposição. A combinação de materiais com diferentes propriedades mecânicas, como rigidez e elasticidade, possibilita a fabricação de peças com funcionalidades integradas, expandindo o leque de aplicações industriais.

2.1 Ácido polilático-PLA

O PLA, Figura 1, tem se consolidado como uma escolha dominante no processo FDM, devido à sua facilidade de impressão, baixa toxicidade e custo acessível. É amplamente empregado em impressões 3D do tipo FDM devido à sua alta rigidez, excelente resistência mecânica e facilidade de uso (Madhavan *et al.*, 2014). Trata-se de um poliéster alifático biodegradável, derivado principalmente de recursos renováveis, e pode substituir de maneira eficaz os polímeros convencionais originados do petróleo. No entanto, para determinadas aplicações, o uso do PLA pode ser limitado, uma vez que apresenta baixa resistência ao impacto e uma temperatura de transição vítrea relativamente baixa (entre 55 e 60 °C) (Camargo *et al.*, 2019). Rosa, Silva e Soares (2022) analisaram a resistência mecânica de resíduos de ácido polilático (PLA) provenientes da impressão 3D. Aliheidari *et al.* (2017) e Chacón *et al.* (2017) demonstraram que as propriedades mecânicas do PLA produzido por FDM apresentam variações significativas, influenciadas tanto pelos parâmetros de impressão quanto pela heterogeneidade inerente às amostras fabricadas.

Figura 1- Estrutura do PLA



Fonte: NatureWorks (2022)

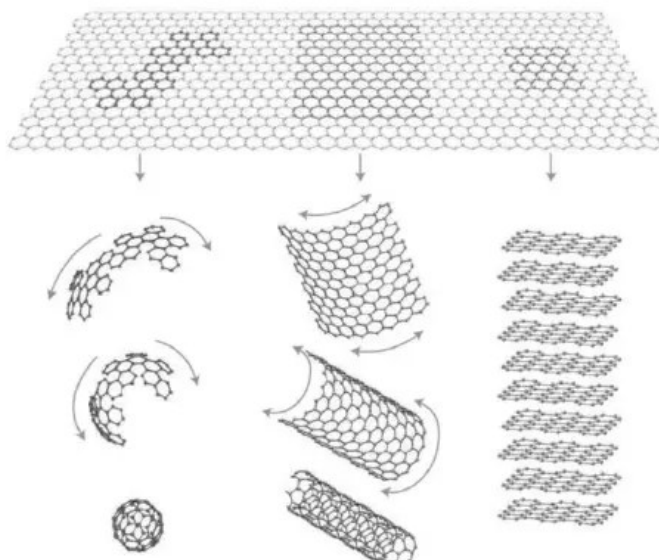
2.2 Grafeno

Hasan e Marion (2016) destacam que o grafeno é considerado um dos materiais mais promissores da atualidade devido ao seu amplo potencial de aplicação em áreas como nanoquímica, nanoengenharia, nanobiologia, medicina, engenharia, eletrônica e energia. Os autores ressaltam que diversos investimentos vêm sendo realizados, especialmente no

exterior, para o desenvolvimento de produtos inovadores baseados nesse nanomaterial. No Brasil, entretanto, as pesquisas ainda se concentram predominantemente no desenvolvimento e na caracterização do grafeno, evidenciando a necessidade de maior integração entre empresas, universidades e centros de pesquisa para ampliar sua inserção em aplicações industriais.

Sendo o material mais fino conhecido, o grafeno apresenta uma estrutura cristalina hexagonal formada por uma única camada de átomos de carbono com hibridização sp^2 , como ilustrado na Figura 2 (Vieira Segundo e Vilar, 2016). Esse material serve como a estrutura fundamental para a formação de diversas formas alotrópicas do carbono. A primeira estrutura, da esquerda para a direita, é o fullereno, uma esfera composta de grafeno. A segunda, um nanotubo de carbono, apresenta um formato cilíndrico. Por fim, a terceira estrutura representada na Figura 2, é o grafite formado, por mais de 90 camadas de grafeno (Vieira Segundo e Vilar, 2016).

Figura 2 - Estrutura do Grafeno



Fonte: Vieira Segundo e Vilar, 2016

O grafeno é uma forma alotrópica do carbono com uma estrutura de favo de mel, composta por uma única camada de átomos, conhecida como monocamada ou grafeno de camada única (1G). Este material é fundamental na formação de outros objetos de carbono, como o grafite e os nano tubos. A partir do grafeno, pode-se ainda ter grafeno de duas camadas (2G) ou grafeno de poucas camadas (FLG) com diferentes propriedades. O grafeno é extremamente fino, mas apresenta resistência mecânica superior ao aço, com limite de resistência à tração que pode atingir até 130 GPa, muito superior ao aço SAE 4140 (0,65 GPa) (Vieira Segundo e Vilar, 2016; Aços Roman, 2023).

Além da resistência mecânica, o grafeno se destaca pelas suas propriedades eletrônicas e térmicas, o que o torna interessante para aplicações em eletrônicos e em dispositivos como baterias e supercapacitores (Vieira Segundo e Vilar, 2016).

2.3 PLA com Grafeno

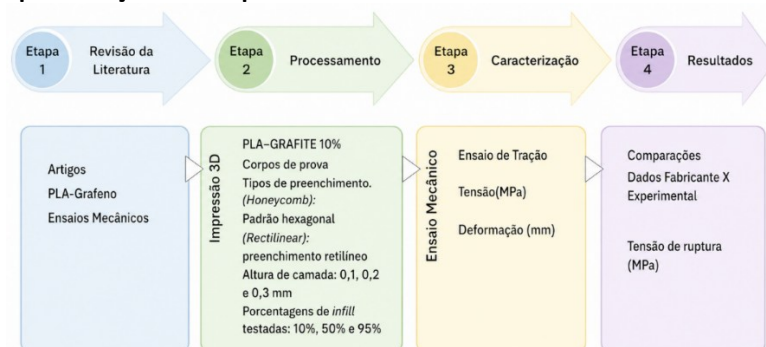
Os compósitos de PLA reforçados com grafeno apresentam elevado potencial para aplicações funcionais e técnicas, uma vez que a combinação entre o nanomaterial e a adequada seleção dos parâmetros de impressão por FFF pode promover melhorias significativas na resistência à tração, resistência à flexão, resistência ao impacto e condutividade elétrica. Os resultados evidenciam que fatores como orientação de impressão, padrão e densidade de preenchimento, altura de camada e velocidade de impressão exercem influência direta sobre o desempenho eletromecânico das peças (Ishfaq *et al.*, 2026).

Em uma abordagem complementar, Liensenfeld (2023) investigou os efeitos do recozimento térmico sobre peças impressas com PLA e PLA-grafeno, verificando que o pós-processamento pode contribuir para o alívio de tensões internas e melhoria da estabilidade dimensional.

3 METODOLOGIA

O material utilizado na impressão foi o filamento PLA com 10% de grafeno. Inicialmente, foi realizada uma revisão de literatura com foco na aplicação do PLA com grafeno na manufatura aditiva, abrangendo estudos publicados entre 2015 e 2025 nas bases Google Acadêmico e Scopus. Para isso, foram empregados termos de busca como “PLA com grafeno” e “ensaios mecânicos”, priorizando publicações que abordassem propriedades mecânicas, térmicas e parâmetros de impressão. Com base nos achados da literatura, foi adotado uma abordagem experimental visando analisar o comportamento mecânico de corpos de prova produzidos em PLA Premium com adição de 10% de grafeno, utilizando a tecnologia de impressão 3D do tipo FDM (*Fused Deposition Modeling*) conforme Figura 3.

Figura 3 - Representação das etapas realizadas no trabalho



Fonte: Dos autores (2025)

3.1 Preparação dos Modelos e Parâmetros de Impressão

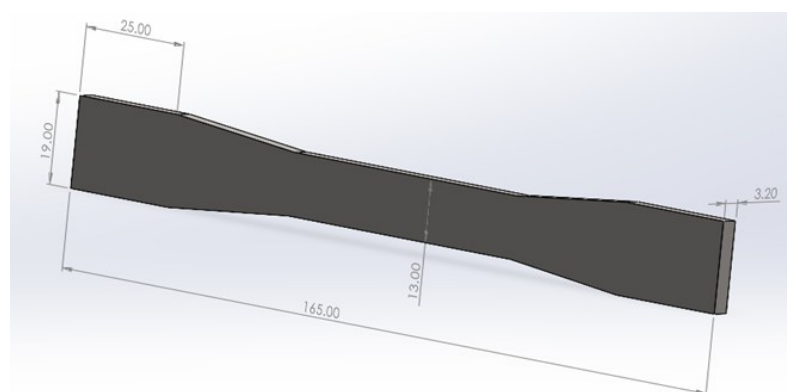
Os corpos de prova foram modelados seguindo as dimensões estabelecidas pela norma ASTM D638-14, tipo I, em software CAD (*Computer-Aided Design*) Figura 4, e exportados no formato STL para o software Repetier-Host com fatiador Slic3r. Os parâmetros de impressão utilizados foram definidos com base em recomendações do fabricante do

filamento e em estudos prévios de otimização de impressão com PLA e grafeno (Camargo *et al.*, 2019;). Os principais parâmetros fixados foram:

- Temperatura do bico extrusor: 210 °C;
- Temperatura da mesa aquecida: 60 °C;
- Altura de camada: 0,1, 0,2 e 0,3 mm;
- Velocidade de impressão: 45 mm/s;
- Diâmetro do bico: 0,4 mm;
- Tipo de preenchimento: reticulado (*grid*); e
- Porcentagens de *infill* testadas: 10%, 50% e 95%.

Todas as amostras foram impressas na orientação horizontal, com três amostras por grupo, totalizando 18 corpos de prova. O material foi fornecido pela empresa Voolt 3D, via tecnologia FDM (Fused Deposition Modeling), garantindo a qualidade do material das amostras.

Figura 4 - Desenho do corpo de prova conforme ASTM D638



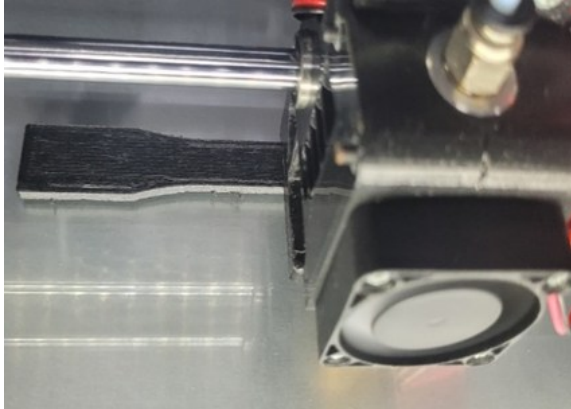
Fonte: Dos autores (2025)

3.2 Preparação das Amostras

Os corpos de prova foram confeccionados por meio do processo de manufatura aditiva, Figura 5 utilizando uma impressora 3D GTMax3D Core A2, modelo de fabricação nacional lançado em 2019. Este equipamento é dotado de um volume útil de impressão de 220 × 220 × 240 mm, bico extrusor padrão de 0,4 mm com capacidade térmica de até 295 °C, e mesa aquecida que pode atingir até 135 °C, o que permite a impressão de uma ampla gama de termoplásticos, como PLA, PETG, ABS, Tritan e Flex. A velocidade máxima nominal de impressão é de 150 mm/s. Durante o processo de impressão, os corpos de prova mantiveram dimensões geométricas constantes, com variação apenas em dois parâmetros-chave: espessura da camada (*layer height*) e percentual de preenchimento interno (*infill*). Essa variação visou avaliar experimentalmente os efeitos dessas variáveis na resistência à tração e no comportamento mecânico global das amostras Figura 6. Para assegurar adequada adesão da primeira camada e minimizar a ocorrência de descolamentos, aplicou-se adesivo A. Bond sobre a superfície da mesa de impressão aquecida, cuja temperatura foi mantida entre 60 e 70 °C. A velocidade de impressão foi controlada entre 35 e 45 mm/s, buscando otimizar a qualidade superficial e a fidelidade dimensional das peças.

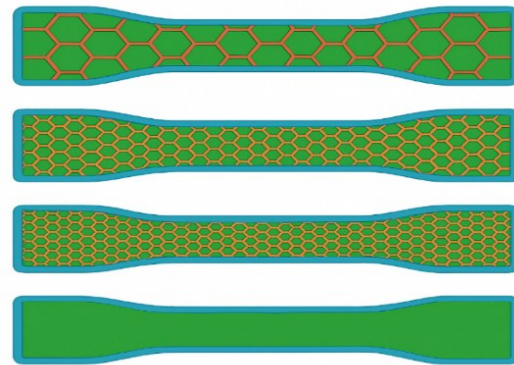
Essas condições operacionais foram padronizadas a fim de garantir reprodutibilidade, consistência dimensional e homogeneidade estrutural das amostras, constituindo uma base experimental robusta para os ensaios mecânicos subsequentes.

Figura 5 - Impressão de corpo de prova



Fonte: Dos autores (2025)

Figura 6- Níveis de preenchimento



Fonte: Dos autores (2025)

3.3 Codificação das Amostras

As amostras foram identificadas com uma nomenclatura padronizada, conforme a porcentagem e tipo de preenchimento que permite a rápida identificação de suas principais características construtivas Figura 7. Um exemplo de codificação é o código `plagf10_0110hc`, cuja estrutura da nomenclatura segue o seguinte padrão:

- PLA: indica o polímero base (ácido polilático);
- GF10: refere-se à adição de 10% de grafeno;
- 01: espessura da camada (em milímetros), ou seja, 0,1 mm;
- 10: percentual de preenchimento interno (*infill*), neste caso, 10%; e
- hc/rr: tipo de padrão de preenchimento: hc (*Honeycomb*): padrão hexagonal, que proporciona boa resistência com menor massa; rr (*Rectilinear*): preenchimento retilíneo, com linhas paralelas alternadas, que oferece estabilidade dimensional e rapidez de impressão.

Figura 7- Identificação dos corpos de prova



Fonte: Dos autores (2025)

3.4 Execução dos Ensaios de Tração

Os ensaios de tração foram conduzidos em uma máquina universal de ensaios Instron 3369, com célula de carga de 50 kN e velocidade de ensaio de 5 mm/min, sendo ensaiados 3 corpos de prova para cada condição conforme norma técnica ASTM D638. Os dados de força e deslocamento foram registrados pelo software da máquina e convertidos em tensão (MPa) e deformação (%) para posterior análise. Os corpos de prova foram fixados em garras com pressão controlada, respeitando os procedimentos especificados na norma ASTM D638 -Tipo I. O Corpo de prova no início do ensaio está na Figura 8 e o Corpo de prova ao término do ensaio está na Figura 9.

Figura 8 - Corpo de prova no início do ensaio



Fonte: Dos autores (2025)

Figura 9 - Corpo de prova ao término do ensaio



Fonte: Dos autores (2025)

3.5 Tratamento e Análise dos Dados

Os dados obtidos foram organizados em planilhas eletrônicas e analisados estatisticamente com o auxílio do software Microsoft Excel. Para cada grupo de *infill*, foram calculadas as médias e desvios padrão dos seguintes parâmetros: Tensão máxima ($\sigma_{\text{máx}}$), Módulo de elasticidade (E) e Deformação na ruptura (ϵ_r)

As curvas tensão-deformação foram geradas para cada amostra e comparadas graficamente. A partir da comparação entre os diferentes *infills*, buscou-se identificar o padrão de influência do percentual de preenchimento sobre a rigidez e a resistência dos corpos de prova.

4 RESULTADOS

Aqui são apresentados os resultados obtidos as quais são comparados a trabalhos semelhantes encontrados na literatura. A Tabela 1 apresenta os dados de tensão e deformação preenchimento *honeycomb* (colmeia), indicando os valores de tensão máxima (MPa) e deformação (mm) obtidos. Para uma fácil interpretação dos resultados das tensões dos dois tipos de preenchimento e suas variações, são apresentados os gráficos de barras com erros nas Figuras 10 e 11. Há variação significativa da resistência mecânica entre as amostras, de 21,78 MPa a 45,65 Mpa (amostra plagf10_0195hc). A deformação, por sua vez, oscilou entre 4,07 mm e 6,13 mm, indicando que algumas combinações de espessura de camada e *infill* promovem não apenas maior resistência, mas também maior capacidade de alongamento antes da ruptura.

Na Tabela 2 estão os resultados dos ensaios de tração das amostras com preenchimento *rectilinear* (retilíneo), com os valores de tensão máxima (MPa) e deformação (mm) para cada condição testada. Nota-se que a amostra plagf10_0195rr apresentou o melhor desempenho mecânico, atingindo uma tensão máxima de 48,93 MPa, enquanto o menor valor registrado foi 20,08 MPa (plagf10_0110rr). As deformações mantiveram-se relativamente próximas entre si, variando de 4,06 mm a 5,05 mm, o que indica uma resposta relativamente estável quanto à ductilidade.

Tabela 1 - Dados de tensão e deformação para corpos de prova com preenchimento *honeycomb*

<i>Honeycomb</i>		
Amostra	Tensão (MPa)	Deformação (mm)
plagf10_0110hc	21,78	4,22
plagf10_0150hc	29,39	4,25
plagf10_0195hc	45,65	6,13
plagf10_0210hc	27,96	4,07
plagf10_0250hc	33,91	4,73
plagf10_0295hc	44,32	5,28
plagf10_0310hc	32,53	4,34
plagf10_0350hc	40,84	4,51
plagf10_0395hc	41,31	4,71

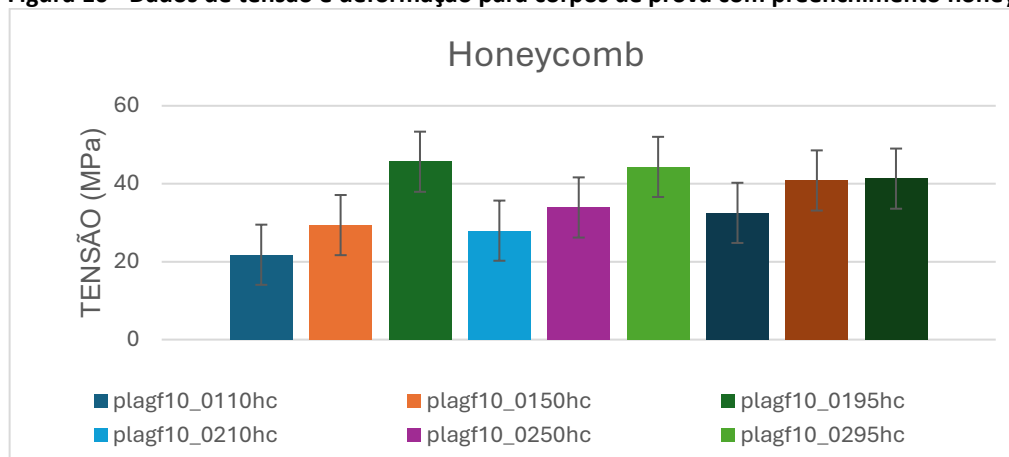
Fonte: Dos autores (2025)

Tabela 2 - Dados de tensão e deformação para corpos de prova com preenchimento *rectilinear*

<i>Rectilinear</i>		
Amostra	Tensão (MPa)	Deformação (mm)
plagf10_0110rr	20,08	4,17
plagf10_0150rr	29,03	4,06
plagf10_0195rr	48,93	5,05
plagf10_0210rr	25,59	4,13
plagf10_0250rr	32,06	4,77
plagf10_0295rr	31,83	4,64
plagf10_0310rr	29,79	4,39
plagf10_0350rr	39,91	4,66
plagf10_0395rr	45,66	4,62

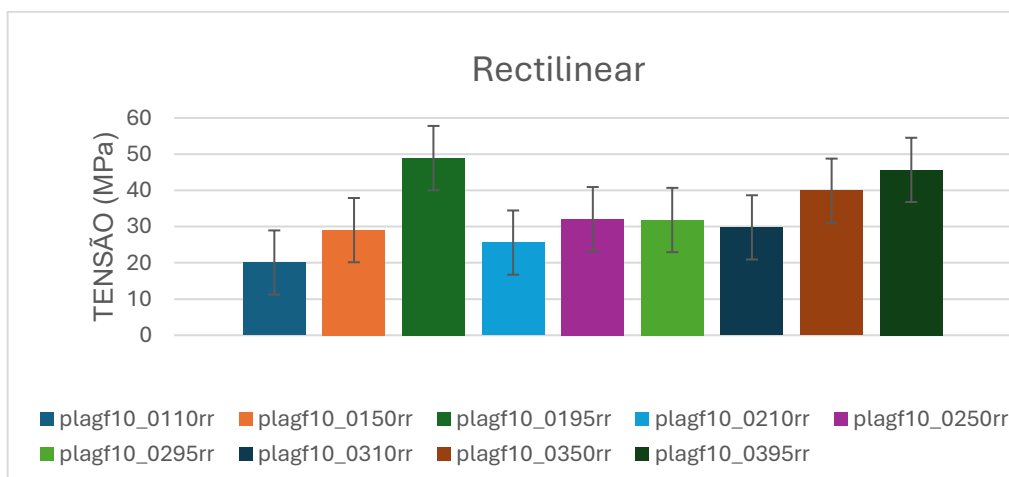
Fonte: Dos autores (2025)

Figura 10 - Dados de tensão e deformação para corpos de prova com preenchimento *honeycomb*



Fonte: Dos autores (2025)

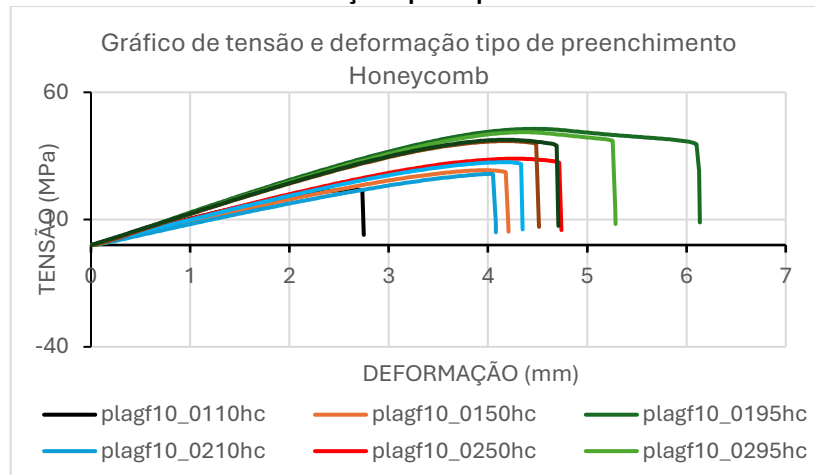
Figura 11 - Dados de tensão e deformação para corpos de prova com preenchimento *rectilinear*



Fonte: Dos autores (2025)

Ao comparar os resultados dos ensaios de tração, que graficamente podem ser vistos nas Figura 13as 12 e 13 para as amostras com preenchimentos *Honeycomb* e *Rectilinear*, observa-se que ambos os perfis apresentam desempenhos similares. A média de resistência à tração para o preenchimento *Honeycomb* foi de 35,29 MPa com um desvio padrão de 7,72%, enquanto o *Rectilinear* obteve uma média de 33,65 MPa e desvio padrão de 8,87%.

Figura 12 - Gráfico de tensão e deformação tipo de preenchimento

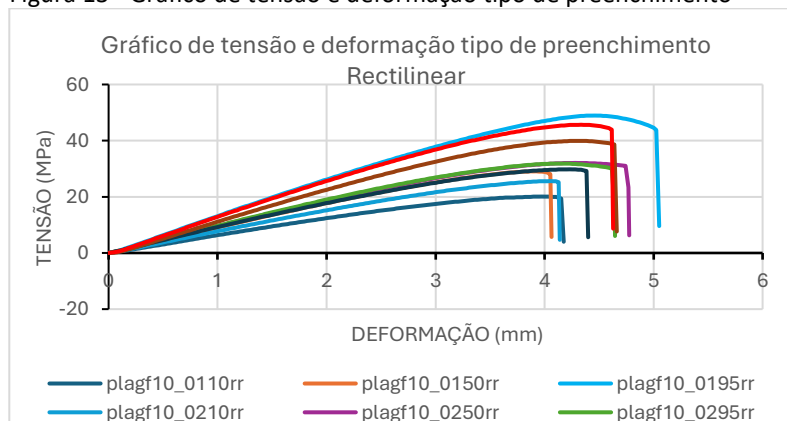


Fonte: Dos autores (2025)

A análise dos dados sugere que o padrão de preenchimento *Honeycomb* oferece maior consistência na resistência mecânica, provavelmente devido à melhor distribuição das tensões internas proporcionada pela sua geometria hexagonal, característica já destacada em estudos como o de Aliheidari *et al.* (2017).

Sajjad *et al.* (2023) demonstraram que a estratégia de preenchimento (*infill*) exerce influência direta sobre o desempenho mecânico de peças produzidas por FDM, uma vez que a orientação e a geometria interna determinam a forma como as cargas são distribuídas ao longo da estrutura. Nesse contexto, o preenchimento *rectilinear* apresentou desempenho superior em ensaios de tração e em análises de frequência natural, devido ao alinhamento contínuo das linhas de filamento, que favorece a transferência de carga e aumenta a rigidez estrutural.

Figura 13 - Gráfico de tensão e deformação tipo de preenchimento



Fonte: Dos autores (2025)

Também ressalta-se que o preenchimento *rectilinear* mostrou-se mais sensível à orientação de impressão e às variações geométricas, resultando em maior dispersão dos resultados experimentais. Por sua vez, o preenchimento *honeycomb* destacou-se nos ensaios de flexão e compressão, em razão de sua estrutura celular fechada, capaz de promover uma distribuição mais uniforme das tensões e maior resistência ao colapso localizado, contribuindo para um comportamento mecânico mais estável nessas solicitações (Sajjad *et al.*, 2023).

4.1 Parâmetros utilizados pelo fabricante

Os dados apresentados na Tabela 3, fornecidos pelo fabricante dos filamentos, evidenciam melhorias significativas nas propriedades mecânicas do PLA com adição de grafeno. O PLA *Premium* Grafeno, nome dado pelo fabricante e utilizado nesse estudo, apresentou melhoras significativas nas propriedades mecânicas, registrando aumentos de 36,3% na tensão de escoamento, 33,7% na tensão de ruptura e 40% no módulo elástico, em comparação ao PLA puro.

Tabela 3 - Dados técnicos do laudo do fabricante do filamento

Resultado / Amostras	PLA puro (média)	PLA <i>Premium</i> Grafeno (média)	Variação <i>Premium</i> Grafeno x PLA Puro (%)
Tensão Escoamento (MPa)	22,75	31,01	36,3
Tensão Ruptura (MPa)	21,48	28,72	33,7
Módulo Elástico (MPa)	1550	2170	40

Fonte: Adaptado de Passatore Consultoria (2021)

4.2 Comparativo e discussão

Ao comparar os dados fornecidos pelo fabricante com os resultados obtidos nos ensaios experimentais, observa-se uma coerência geral nas tendências de maior resistência devido a adição do grafeno, ainda que haja diferenças quantitativas significativas nos valores absolutos. De acordo com o fabricante, o PLA *Premium* Grafeno apresentou tensão de ruptura média de 28,72 MPa, enquanto o melhor desempenho obtido experimentalmente para os corpos de prova com o mesmo material e padrão de preenchimento foi de 48,93 MPa (plagf10_0195rr), representando um aumento de aproximadamente 70% em relação ao valor divulgado.

Esse desvio pode ser atribuído a diferentes fatores, como otimizações nos parâmetros de impressão, condições ambientais controladas, configuração de *infill* e orientação das camadas, que impactam diretamente na resistência final das peças produzidas por FDM. Além disso, os ensaios experimentais avaliaram a influência combinada do tipo e percentual de preenchimento e espessura de camada, o que não é detalhado nos dados do fabricante, geralmente obtidos sob condições padronizadas.

As diferenças observadas em relação aos valores fornecidos pelo fabricante indicam que a otimização dos parâmetros exerce influência significativa sobre o desempenho final das peças, confirmando os estudos de Camargo *et al.* (2019) e Liensenfeld (2023), que destacam a forte anisotropia do processo FDM em geral e a importância do ajuste fino desses parâmetros. Embora os resultados experimentais tenham superado ligeiramente os valores de ruptura declarados pelo fabricante (28,72 MPa), essa variação não compromete a

confiabilidade do material, pelo contrário, reforça a necessidade de considerar as condições reais de fabricação ao interpretar dados técnicos de filamentos comerciais. Dessa forma, este estudo contribui para a compreensão de como ajustes no processo podem ampliar o desempenho mecânico do PLA com grafeno, evidenciando oportunidades para pesquisas futuras voltadas à padronização de parâmetros e à aplicação funcional desses compósitos.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou o comportamento mecânico de corpos de prova impressos em PLA com adição de 10% de grafeno, utilizando a tecnologia FDM e diferentes parâmetros de fabricação. Conforme proposto, o objetivo foi verificar se a modificação do PLA com grafeno e a variação de parâmetros como preenchimento e espessura de camada influenciam significativamente a resistência à tração do material.

Os ensaios demonstraram que o padrão de preenchimento reticulado (*rectilinear*) aliado à espessura de camada de 0,10 mm e 95% de *infill* (amostra *plagf10_0195rr*) proporcionou o melhor desempenho, atingindo 48,93 MPa de tensão de ruptura e 5,05 mm de deformação, superando em mais de 70% o valor médio de ruptura informado pelo fabricante para o PLA *Premium* Grafeno (28,72 MPa). No padrão *honeycomb*, o maior valor de tensão foi de 45,65 MPa, indicando também excelente desempenho estrutural.

Comparativamente, os dados experimentais evidenciam que os corpos de prova produzidos com configurações otimizadas superaram os valores fornecidos pela indústria em todas as categorias analisadas. O mesmo o PLA Max Grafeno, com maior teor de grafeno, apresentou desempenho inferior ao *Premium* Grafeno em testes padronizados, reforçando que a qualidade da impressão e os parâmetros aplicados impactam mais que o teor de reforço adicionado. Em suma, a impressão 3D com PLA grafeno amplia as propriedades mecânicas do material e permite ajustar o desempenho final por meio do controle preciso dos parâmetros de processo. Como este trabalho restringiu-se ao uso de um único tipo de impressora, de um único material (PLA com 10% de grafeno) e não considerou variáveis como orientação das camadas, pós-processamento térmico ou envelhecimento das amostras, recomenda-se que pesquisas futuras explorem diferentes concentrações de grafeno, outros padrões de *infill*, tratamentos pós-impressão, ensaios de fadiga, além da análise térmica e microestrutural dos materiais impressos.

REFERÊNCIAS

AÇOS ROMAN. **SAE 4140: aço cromo-molibdênio**. 2023. Disponível em: <https://aco.com.br/inicio/aco/sae-4140-cromo-molibdenio-cr-mo>. Acesso em: 15 set. 2025.

ALIHEIDARI, N. *et al.* Fracture resistance measurement of fused deposition modeling 3D printed polymers. **Polymer Testing**, v. 60, p. 94–101, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638-14**: Standard test method for tensile properties of plastics. West Conshohocken, USA: ASTM International, 2022.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CAMARGO, J. C. *et al.* Mechanical properties of PLA-graphene filament for FDM 3D printing. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 103, n. 5–8, p. 2423–2443, 2019.

CANEVAROLO JÚNIOR, S. V. **Ciência dos polímeros**: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. São Paulo: Artliber Editora, 2013.

CASTELO BRANCO, R. R. *et al.* Performance characterization of Polylactic Acid (PLA) material manufactured by Fusion and Deposition Modeling (FDM) technology. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 8, e44210817348, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i8.17348>.

CHACÓN, J. M.; CAMINERO, M. A.; GARCÍA-PLAZA, E.; NÚÑEZ, P. J. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. **Materials & Design**, v. 124, p. 143–157, 2017. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.03.065.

FENOLLOSA, F. *et al.* Research on desktop 3D printing multi-material new concepts. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 1193, p. 012043, 2021. DOI: 10.1088/1757-899X/1193/1/012043.

GOKHARE, V. G.; RAUT, D. N.; SHINDE, D. K. A review paper on 3D-printing aspects and various processes used in 3D printing. **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**, v. 6, n. 6, p. 953–960, 2017. Disponível em: <https://www.ijert.org/research/a-review-paper-on-3d-printing-aspects-and-various-processes-used-in-the-3d-printing-IJERTV6IS060409.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2025.

HASAN, Nasser Mahmoud; MARION, Bianca Dall Gallo. Grafeno: Inovações, Aplicações e sua Comercialização. **Interfaces Científicas - Exatas e Tecnológicas**, v. 2, n. 1, p. 29–40, 2016. DOI: 10.17564/2359-4942.2016v2n1p29-40.

ISHFAQ, K.; HARRIS, M.; MURUGESAN, S. K.; HABIB, M. S.; ULLAH, M.; ANWAR, S.; ALFAIFY, A. Y. Processing–property relationships in 3D printed PLA/graphene composites for synergistic enhancement of mechanical strength and electrical conductivity. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 40, p. 2543–2558, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.12.269>.

KAMRAN, M.; SAXENA, A. A comprehensive study on 3D printing technology. **MIT International Journal of Mechanical Engineering**, v. 6, n. 2, p. 63–68, 2016.

LIESENFELD, Janaina. **Efeito do pós-processamento por recozimento sobre as propriedades do PLA impresso com e sem adição de grafeno**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2023. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/29629>. Acesso em: 10 mar. 2025.

MADHAVAN, Priya *et al.* 3D Printing-beyond innovation. **J Adv Med Dent Scie**, v. 2, n. 1, p. 100-105, 2014.

PASSATORE CONSULTORIA. **Relatório de análise em filamento PLA com grafeno**. São Paulo: Passatore Consultoria, 2021.

ROSA, M. E. R. C.; SILVA, V. F.; SOARES, E. P. Análise da resistência de resíduos de ácido polilático (PLA) proveniente de impressão 3D. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 13, n. 2, p. 198–205, 2022. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.002.0018>.

SAJJAD, R.; BUTT, S. U.; SAEED, H. A.; ANWAR, M. T.; RASHEED, T. Impact of multiple *infill* strategy on the structural strength of single build FDM printed parts. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 89, p. 105–110, 2023. DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.01.065.

VIEIRA SEGUNDO, J. E. D.; VILAR, E. O. Grafeno: uma revisão sobre propriedades, mecanismos de produção e potenciais aplicações em sistemas energéticos. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 11, n. 2, p. 54–57, 2016. Disponível em: <https://remap.revistas.ufcg.edu.br/index.php/REMAP/article/view/493> . Acesso em: 10 mar. 2025.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Universitário SENAI-SP, Campus Brás pelo suporte na pesquisa e à Universidade Federal do ABC pelo suporte nos testes com os corpos de prova.

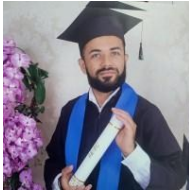
Sobre os Autores:

ⁱ Willian Leonardo dos Santos



Graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade Braz Cubas, com formação técnica em Mecânica pelo Liceu Braz Cubas e especialização em andamento em Projetos de Mecânica Industrial pela Faculdade SENAI-SP. Possui ampla experiência em engenharia de custos e processos mecânicos, com atuação em orçamentação de peças estampadas, conjuntos soldados e redutores industriais. forte conhecimento em materiais, processos produtivos e peritagem técnica.

ii **Edgard Gonçalves Cardoso**



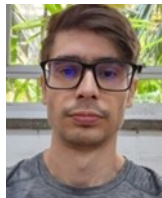
Engenheiro de Produção Mecânica e de Segurança do Trabalho, mestre e doutorando em Energia, com especializações em Manutenção Industrial, Gestão de Projetos, Gestão de Pessoas e Educação. Atua como Técnico de Laboratório na UFABC e professor de ensino superior no Centro Universitário SENAI-SP, com experiência em manutenção, energia, educação e gestão de riscos. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8953-9464>

iii **Leandro Cardoso da Silva**



Possui graduação em Engenharia de Produção Mecânica pelo Centro Universitário Nove de Julho, Mestrado em Engenharia de Materiais pela Universidade Presbiteriana Mackenzie e Doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade de São Paulo. Atualmente é professor e pesquisador no Centro Universitário Senai-SP e na FATEC, lecionando disciplinas nas áreas de DFMA, FEA, CFD e Processos de Fabricação. Tem experiência na área de Engenharia de Produção e Materiais, com ênfase em desenvolvimento de produtos, manufatura aditiva e engenharia aplicada à Indústria 4.0. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1636-3685>.

iv **Lucas Almeida Willenshofer**



Graduado em Engenharia de Controle e Automação e Engenharia Elétrica, mestre em Engenharia Mecânica (IFSP). Professor no SENAI-SP e ENIAC, com experiência em Automação Industrial, Engenharia Elétrica, IoT, redes industriais e integração de sistemas voltados à Indústria 4.0. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8884-7607> .

v **Manuel Patricio da Silva Bisneto**



Doutor em Nanociências e Materiais Avançados (UFABC), mestre em Engenharia Mecânica e Aeronáutica (ITA), especialista em Engenharia de Produção e graduado em Tecnologia em Processos de Produção. Professor e consultor com experiência em desenvolvimento de produtos, gestão de projetos, Lean Manufacturing, modelagem 3D e simulações. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2176-2288>