

## CARACTERIZAÇÃO DE COMPONENTES FABRICADOS POR MANUFATURA ADITIVA USANDO ULTRASSOM

Diego Takeshi Kawaguchi ([d2020029592@unifei.edu.br](mailto:d2020029592@unifei.edu.br))<sup>(1)</sup>, Paulo Pereira <sup>(1)</sup> ([paulopj@unifei.edu.br](mailto:paulopj@unifei.edu.br))

<sup>(1)</sup> Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI); Instituto de Engenharia Mecânica (IEM)

**RESUMO:** *A manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D, tem sido cada vez mais utilizada na indústria devido ao seu baixo custo na produção de componentes mecânicos quando comparada aos métodos tradicionais. Neste sentido, torna-se fundamental o desenvolvimento de técnicas de caracterização mecânica dos componentes fabricados por impressão 3D, principalmente em aplicações em que estes componentes têm função estrutural. Este trabalho tem como objetivo avaliar a técnica de caracterização mecânica baseada na utilização de ondas ultrassônicas em corpos de prova de poliláctico (PLA) fabricados por manufatura aditiva. Ensaios por ultrassom têm a grande vantagem de serem considerados não destrutivos. A caracterização neste trabalho foi baseada na obtenção das constantes elásticas do material através de medições da velocidade de propagação das ondas através do material e utilizando a equação de Christoffel. Fazendo a comparação dos resultados obtidos por ultrassom com os resultados obtidos por ensaio de tração convencional, foi verificada ótima concordância entre os resultados das duas técnicas, com a diferença de valores variando entre 2 e 17%, dependendo da amostra.*

**PALAVRAS-CHAVE:** IMPRESSÃO 3D, ULTRASSOM, POLILÁCTICO LÁCTICO, CARACTERIZAÇÃO.

## CHARACTERIZATION OF COMPONENTS MANUFACTURED BY ADDITIVE MANUFACTURING USING ULTRASOUND

**ABSTRACT:** *Additive manufacturing, also known as 3D printing, has been increasingly used in industry due to its low cost in the production of mechanical components when compared to traditional methods. In this sense, the development of mechanical characterization techniques for components manufactured by 3D printing is essential, especially in applications in which these components have a structural function. This work aims to evaluate the mechanical characterization technique based on the use of ultrasonic waves in polylactic acid (PLA) specimens obtained by additive manufacturing. Ultrasound testing has the great advantage of being considered non-destructive. The characterization in this work was based on obtaining the elastic constants of the material through measurements of the wave propagation speed through the material and using the Christoffel equation. Comparing the results obtained by ultrasound with the results obtained by conventional tensile testing, excellent agreement was verified between the results of the two techniques, with the difference in values varying between 2 and 17%, depending on the sample.*

**KEYWORDS:** 3D PRINTING, ULTRASOUND, POLYLACTIC ACID, CHARACTERIZATION.

## 1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva, usualmente conhecida como impressão 3D, está não só presente hoje em laboratórios e indústrias, mas também em oficinas e residências particulares, tamanha é a sua popularização. A redução dos custos de impressoras e matéria prima faz a técnica ser cada vez mais utilizada na fabricação de diversos componentes mecânicos com diferentes formatos e complexidades.

Com relação à matéria prima utilizada em impressão 3D, os materiais mais utilizados comercialmente são os termoplásticos, como o PLA (poliácido láctico), o ABS (acrilonitrilo-butadieno-estireno) e o PETG (polietileno tereftalato glicol). O material PLA apresenta algumas vantagens quando comparado com os outros termoplásticos normalmente utilizados, entre elas estão: melhor acabamento superficial; maior rigidez; temperatura de fusão mais baixa; impressão mais rápida o material é biodegradável e a mesa de impressão não precisa ser adequada para o material. Santana *et al.* (2018) realizaram um estudo comparando os materiais PETG e PLA levando em consideração testes térmicos, mecânicos e químicos. Através do comparativo, foi possível observar que o PLA apresentou melhores propriedades mecânicas, enquanto o PETG foi melhor com relação a propriedades térmicas.

Não somente a matéria prima utilizada na impressão 3D define as propriedades mecânicas do material fabricado, mas também alguns parâmetros de processamento, como o grau ou nível de preenchimento. Se o grau de preenchimento do componente fabricado for de 100%, a peça será totalmente preenchida com o material. Diminuindo esse grau de preenchimento, é possível fabricar peças com o mesmo formato externo, no entanto utilizando menos material. Contudo, é necessário avaliar as consequências de um nível de preenchimento menor nas propriedades mecânicas e integridade estrutural da peça.

A caracterização mecânica de materiais e componentes usualmente é feita através de ensaios destrutivos, como é o caso do ensaio de tração. Pelo ensaio de tração é possível obter informações importantes do material estudado como o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson, tensão de escoamento e tensão de ruptura. Para materiais isotrópicos, como a maioria dos metais, o ensaio de tração pode ser realizado com uma amostra, mas para materiais anisotrópicos como os produzidos por impressão 3D, a carga precisa ser aplicada em diferentes posições da amostra demandando mais material a ser ensaiado.

A caracterização feita usando técnicas ultrassônicas pode ser uma alternativa interessante com relação às técnicas convencionais. Neste sentido, Rokhlin e Wang (1992) foram pioneiros ao apresentar uma técnica para medir velocidade de fase ultrassônica e determinar as constantes elásticas de materiais anisotrópicos. A técnica consiste em medir a diferença de tempo de trânsito

entre dois transdutores em uma configuração de transmissão em que a onda ultrassônica atravessa a amostra duas vezes. Os resultados obtidos foram comparados com outras técnicas de medição de propriedades mecânicas de materiais compósitos e os resultados foram bastante satisfatórios. Na mesma linha de pesquisa, Castellano *et al.* (2014) realizaram um estudo sobre testes ultrassônicos por imersão para caracterizar o compósito baseado em polímero reforçado por fibras de carbono. Através dos ensaios e testes realizados foi possível realizar uma abordagem experimental e numérica. O módulo de elasticidade transversal e longitudinal puderam ser calculados com boa precisão tendo como base medições de velocidade de ondas ultrassônicas.

Em se tratando de materiais produzidos por manufatura aditiva, Rodríguez-Seandra *et al.* (2022) mostraram um estudo de cálculo das constantes elásticas ortotrópicas de materiais fotopoliméricos fabricados a partir de impressão 3D, na qual foram utilizadas técnicas ultrassônicas como forma de se obter os resultados. Os autores apresentaram os modelos experimentais e teóricos para o cálculo das constantes elásticas através das velocidades da onda e espessura dos materiais estudados. Honavar e Varvani-Farahani (2020) fizeram um estudo sobre o teste ultrassônico para encontrar defeitos, caracterizar e melhorar o processo de peças fabricadas por manufatura aditiva. Foram utilizadas diversas técnicas ultrassônicas diferentes e resultados favoráveis foram obtidos, levando em consideração outros tipos de ensaios não destrutivos, como raio-x, por exemplo, uma vez que este tipo de ensaio para peças complexas é muito demorado e caro.

### 1.1 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é analisar a técnica ultrassônica para caracterizar amostras produzidas por impressão 3D com diferentes níveis de preenchimento. Por ser uma técnica não destrutiva e já muito utilizada para caracterizar materiais compósitos que apresentam anisotropia, a técnica se torna importante também para avaliar se a utilização do ultrassom é viável e se apresenta resultados consistentes para este tipo de material polimérico e processado via manufatura aditiva.

### 1.2 Justificativas

Devido à sua versatilidade e praticidade, a técnica ultrassônica usada para caracterização de materiais mostra-se com uma alternativa bastante interessante. Tendo em vista a crescente utilização de materiais feitos por impressão 3D tanto na indústria quanto em outros setores, faz-se necessário o desenvolvimento de técnicas de caracterização mecânica mais versáteis e que sejam não destrutivas para que o processo possa ser barateado. Ao mesmo tempo, as técnicas de

caracterização precisam fornecer dados precisos sobre o material analisado para que a segurança estrutural do componente sendo inspecionado possa ser garantida.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item do trabalho são apresentados os passos seguidos para a impressão das amostras de PLA e a subsequente caracterização mecânica usando a técnica ultrassônica

### 2.1 Impressão das amostras

A matéria prima escolhida neste trabalho foi o PLA (poliácido láctico) por apresentar algumas vantagens quando comparada a outros materiais populares no mercado de impressão 3D, como maior rigidez, melhor acabamento superficial das peças e temperatura de fusão mais baixa. O PLA utilizado foi na forma de filamento com diâmetro de 1,75 mm (Figura 1).

**FIGURA 1.** Filamento de PLA.



**Fonte:** Bittencourt e Frozza (2021).

Para fazer a impressão dos corpos de prova, foi utilizada a impressora 3D *Creality Ender-3* (Figura 2). Os parâmetros principais de impressão estão na Tabela 1. Neste trabalho, variou-se o nível de preenchimento de cada amostra para verificar a influência deste fator nas propriedades mecânicas dos corpos de prova impressos. O nível de preenchimento é um dos fatores que são configurados na impressora e ele está relacionado a quanto do volume da peça será preenchido com PLA. Por exemplo, uma peça com nível de preenchimento de 80% significa que 80% do volume da peça é preenchido com PLA e 20% é composto por vazio. Este fator é alterado na prática através do

ajuste das distâncias entre as linhas de preenchimento de material durante a impressão. A Figura 3 mostra a foto de uma camada de impressão incompleta onde é possível visualizar as linhas de impressão. Com a variação nos níveis de preenchimento, era variada pela impressora a distância entre as linhas de impressão, criando assim espaços vazios nas amostras. A deposição do material durante a impressão seguiu um padrão de linhas na mesma direção em uma mesma camada. Quando era impressa uma nova camada, a direção das linhas de enchimento girava em 90 graus, criando assim um padrão de camadas de 0 e 90° alternadas. Os níveis de preenchimento escolhidos para as amostras neste trabalho foram 75%, 80%, 85%, 90% e 95%.

**FIGURA 2.** Impressora 3D *Creality Ender-3*.



Fonte: Creality (2024).

**TABELA 1.** Principais parâmetros de impressão.

| Parâmetro                | Valor                     |
|--------------------------|---------------------------|
| Espessura das camadas    | 0,2 mm                    |
| Nível de preenchimento   | 75%, 80%, 85%, 90% e 95%. |
| Padrão de enchimento     | Linhas                    |
| Temperatura de impressão | 200 °C                    |
| Temperatura da base      | 65 °C                     |
| Velocidade de impressão  | 50,0 mm/s                 |

Fonte: Autoria própria (2024).

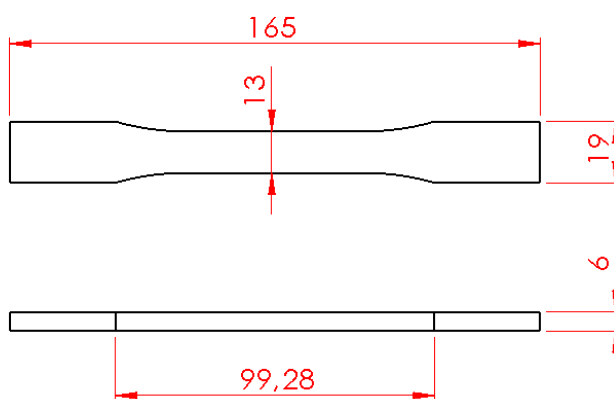
**FIGURA 3.** Foto de camada incompleta da amostra indicando a direção das linhas de impressão.



**Fonte:** Autoria própria (2024).

Dois tipos de amostras foram impressos para a análise experimental deste trabalho. No primeiro tipo, as amostras foram impressas no formato de placas com dimensões de 100 mm x 100 mm x 6 mm. As amostras do segundo tipo foram impressas com o formato específico para a realização de ensaios de tração segundo a norma ASTM D638 (2023). A forma e as principais dimensões das amostras do segundo tipo estão na Figura 4.

**FIGURA 4.** Dimensões principais das amostras impressas para o ensaio de tração. Dimensões em mm.



**Fonte:** Autoria própria (2024).

## 2.2 Caracterização por ultrassom

As constantes elásticas de um material podem ser relacionadas com a velocidade de ondas elásticas que percorrem este material através da solução analítica da equação de Christoffel obtida por Rokhlin e Wang (1992) dada por:

$$\rho V_k^2 = X_k - a/3 \quad (1)$$

onde

$$X_k = 2\sqrt{\frac{-p}{3}} \cos\left(\frac{\vartheta + 2k\pi}{3}\right), \quad k = 1, 2, 3,$$

$$\vartheta = \cos^{-1}\left(\frac{-q}{2\left(\frac{p}{e}\right)^{\frac{3}{2}}}\right);$$

$$p = \frac{a^2}{3} - b;$$

$$q = d - \frac{ab}{3} + 2\left(\frac{a}{3}\right)^3;$$

$$a = -\Gamma_{ii};$$

$$b = -(\Gamma_{12}^2 + \Gamma_{13}^2 + \Gamma_{23}^2 - \Gamma_{11}\Gamma_{22} - \Gamma_{11}\Gamma_{33} - \Gamma_{33}\Gamma_{22});$$

$$d = -(\Gamma_{11}\Gamma_{22}\Gamma_{33} + 2\Gamma_{12}\Gamma_{13}\Gamma_{23} - \Gamma_{11}\Gamma_{23}^2 - \Gamma_{22}\Gamma_{13}^2 - \Gamma_{33}\Gamma_{12}^2);$$

$$\Gamma_{il} = C_{ijkl}n_jn_k;$$

Na Equação 1,  $V_k$  é a velocidade de fase na direção  $k$ ;  $\rho$  a densidade;  $n_j$  e  $n_k$  são cossenos diretores que indicam a direção de propagação da onda e  $C_{ijkl}$  é o tensor de rigidez elástica do material composto pelas constantes elásticas. Uma notação reduzida para representar os componentes do tensor de rigidez pode ser empregada substituindo as combinações de índices 11, 22, 33, 23, 13 e 12 pelos índices 1, 2, 3, 4, 5 e 6, respectivamente (ex.  $C_{1233} = C_{63}$ ) (Pereira Junior, 2011).

As velocidades de onda ultrassônica são obtidas através de medições de tempo de percurso da onda ultrassônica na amostra imersa em água utilizando a seguinte equação:

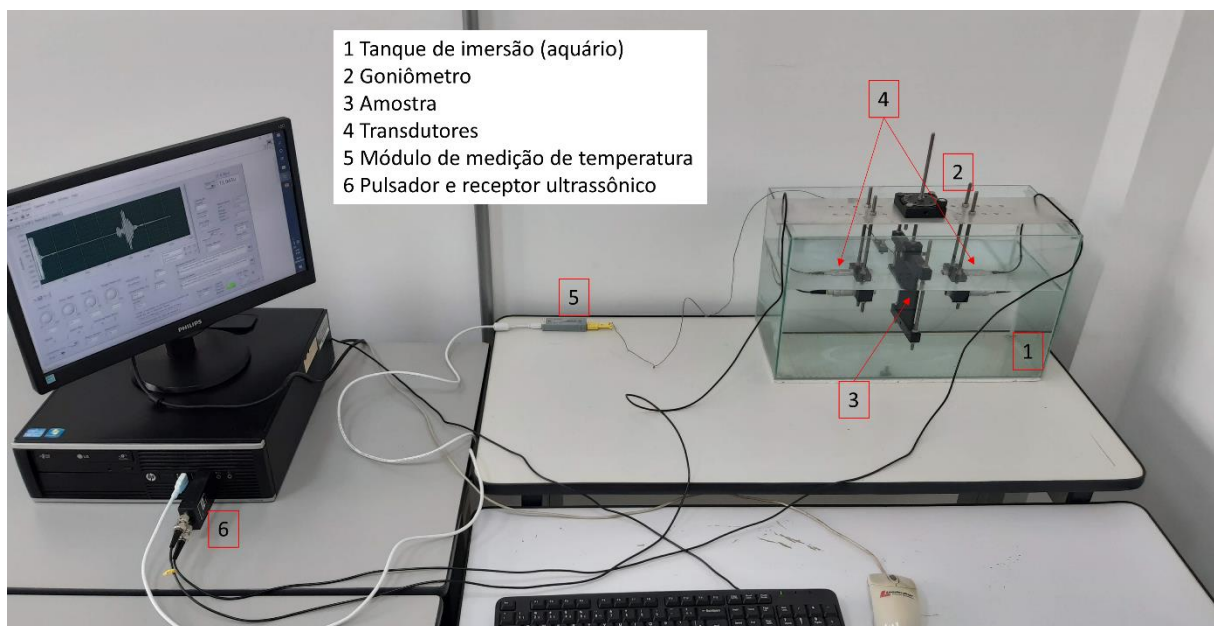
$$V_p = \left( \frac{1}{V_0^2} - \frac{2\Delta t \cos\theta_i}{hV_0} + \frac{(\Delta t)^2}{h^2} \right)^{-1/2} \quad (2)$$



onde  $V_p$  é a velocidade de fase,  $V_0$  é a velocidade da onda na água,  $\Delta t$  é diferença do tempo de percurso da onda com e sem amostra imersa,  $h$  é a espessura da amostra e  $\theta_i$  é o ângulo de incidência da onda na amostra. A diferença de tempo  $\Delta t$  é obtida por meio da correlação cruzada entre o sinal da onda ultrassônica captado pelo transdutor receptor com e sem amostra no tanque de imersão.

O sistema de medição ultrassônico para obtenção das velocidades de onda pode ser visto na Figura 5.

**FIGURA 5.** Sistema de medição ultrassônico.



Fonte: Autoria própria (2024).

No sistema de medição foram utilizados dois transdutores de frequência de 1 MHz e diâmetro do elemento piezelétrico de 12 mm, um pulsador e receptor de ondas ultrassônicas com conversor analógico/digital de 80 MHz conectado a um computador via porta USB, um módulo de aquisição de dados para leitura de temperatura via termopar, um suporte para a amostra com um goniômetro integrado para permitir e controlar a incidência da onda ultrassônica na amostra em vários ângulos e um aquário usado como tanque de imersão. A aquisição e processamento dos sinais ultrassônicos é feito através de uma aplicação desenvolvida com o software Labview®.

O objetivo com o experimento é medir as constantes elásticas do material representadas pelo tensor de rigidez elástica. Para isso, são feitas várias medições de velocidade de onda para vários ângulos de incidência e utilizando a técnica de otimização não linear implementada utilizando a função *lsqnonlin* no software MATLAB, é possível reconstruir as constantes. As amostras neste trabalho são consideradas como sendo ortotrópicas, e neste caso as constantes elásticas



independentes são  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{13}$ ,  $C_{22}$ ,  $C_{23}$ ,  $C_{33}$ ,  $C_{44}$ ,  $C_{55}$  e  $C_{66}$  (Bower, 2009). A relação entre as constantes elásticas e os módulos de elasticidade das amostras são dados por:

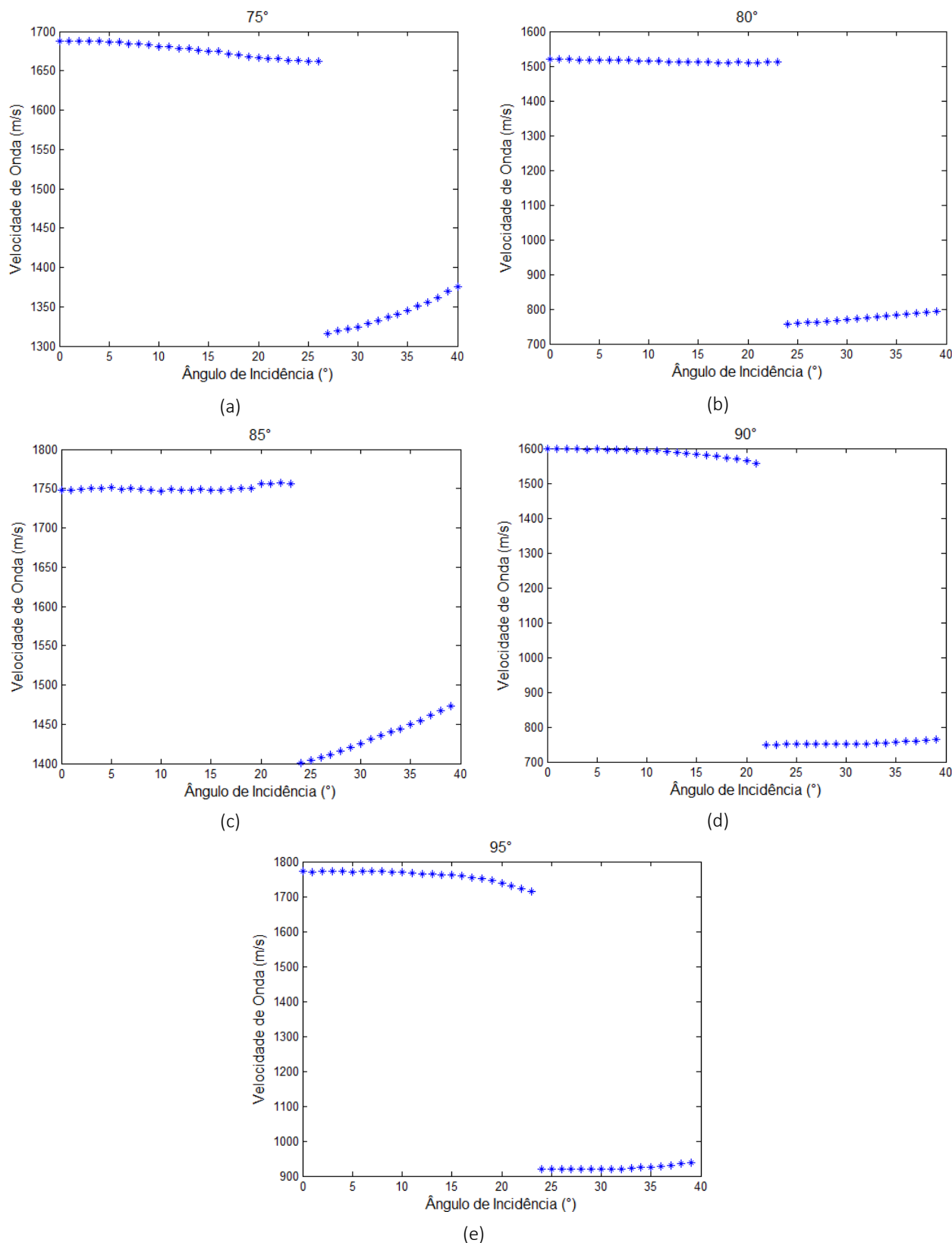
$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{(C_{11}C_{22}C_{33} + 2C_{23}C_{12}C_{13} - C_{11}C_{23}^2 - C_{22}C_{13}^2 - C_{33}C_{12}^2)}{(C_{22}C_{33} - C_{23}^2)} \\ E_2 &= \frac{(C_{11}C_{22}C_{33} + 2C_{23}C_{12}C_{13} - C_{11}C_{23}^2 - C_{22}C_{13}^2 - C_{33}C_{12}^2)}{(C_{11}C_{33} - C_{13}^2)} \\ E_3 &= \frac{(C_{11}C_{22}C_{33} + 2C_{23}C_{12}C_{13} - C_{11}C_{23}^2 - C_{22}C_{13}^2 - C_{33}C_{12}^2)}{(C_{11}C_{22} - C_{12}^2)} \end{aligned} \quad (3)$$

Em função da simetria criada pelo padrão de camadas das amostras, pode-se considerar que  $C_{11} = C_{12}$ ,  $C_{23} = C_{13}$  e  $C_{44} = C_{55}$  e  $C_{66}$ . Neste caso, para as equações (3),  $E_1 = E_2$ . Através da obtenção experimental do módulo de elasticidade por meio de ensaios de tração, é possível comparar estes valores com os valores calculados em função das constantes elásticas obtidas pelo ensaio de ultrassom

### 3. RESULTADOS

Na Figura 6 estão apresentados os gráficos que mostram a variação da velocidade de onda em função do ângulo de incidência para as cinco amostras testadas. Percebe-se uma descontinuidade nos gráficos devido à mudança do tipo de onda refratada nas amostras captada pelo transdutor receptor. A velocidade medida para os ângulos de incidência menores refere-se a onda longitudinal, e após a descontinuidade mede-se a onda transversal ou cisalhante. O ângulo de incidência onde ocorre a descontinuidade no gráfico é conhecido como primeiro ângulo crítico.

**FIGURA 6.** Variação da velocidade de onda em função do ângulo de incidência para as amostras com nível de preenchimento 75%(a), 80%(b), 85%(c), 90%(d) e 95%(e).



Fonte: Autoria própria (2024).

Percebe-se nos gráficos da Figura 6 uma diferença substancial nos valores de velocidade da onda cisalhante a partir do ângulo crítico das amostras com preenchimento de 75% e 85% quando comparada com as outras amostras. Sabe-se que a velocidade da onda cisalhante é aproximadamente a metade do valor da velocidade da onda longitudinal. Para as amostras citadas, o valor da velocidade da onda cisalhante é quase 80% do valor da onda longitudinal, indicando a inconsistência dos dados para estas duas amostras. Estudos mais aprofundados precisam ser realizados para investigar tal efeito.

Com base nas velocidades de onda foi possível calcular as constantes elásticas (Tabela 2) das amostras com preenchimento de 80, 90 e 95%. Os valores obtidos para as amostras 75 e 85% foram bastante discrepantes e, portanto, foram descartados. Analisando os dados da Tabela 2, percebe-se uma tendência de aumento do valor da constante elásticas para as constantes  $C_{11}$ ,  $C_{33}$  e  $C_{44}$  em função do grau de preenchimento da amostra enquanto há uma tendência de queda para a constante  $C_{66}$ . Para a constante  $C_{13}$ , não é possível identificar um padrão.

**TABELA 2.** Constantes elásticas obtidas (valores em GPa).

| Constante           | Nível de preenchimento |        |        |
|---------------------|------------------------|--------|--------|
|                     | 80%                    | 90%    | 95%    |
| $C_{11} (= C_{22})$ | 2,8344                 | 2,9567 | 3,2420 |
| $C_{33}$            | 2,2882                 | 2,8510 | 3,7141 |
| $C_{44} (= C_{55})$ | 0,5251                 | 0,5945 | 0,9361 |
| $C_{66}$            | 4,2653                 | 3,2161 | 1,5476 |
| $C_{13} (= C_{23})$ | 1,0036                 | 1,4117 | 1,1890 |

Fonte: Autoria própria (2024).

Para o cálculo dos módulos de elasticidade pelas equações (3), é necessário também encontrar o valor de constante  $C_{12}$  que não foi possível ser obtida pelo método ultrassônico, uma vez que ela não pode ser isolada da equação (2) em função da direção de propagação das ondas durante o ensaio. Considerando a simetria bidirecional das amostras, considerou-se  $C_{12} = C_{23}$  (Zeng *et al.*, 2005) e foi possível calcular os módulos de elasticidade (Tabela 3).

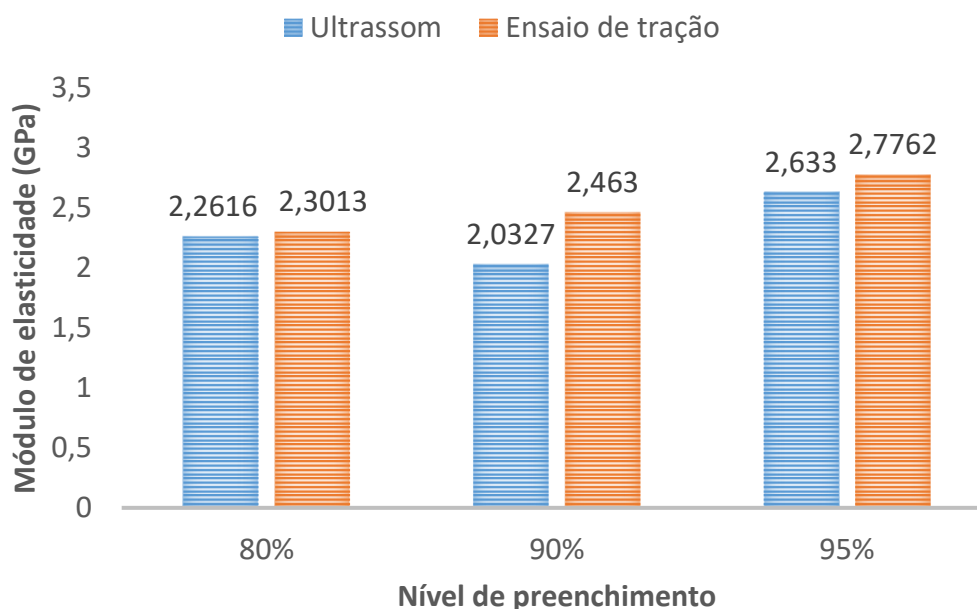
**TABELA 3.** Módulos de elasticidade calculados com dados do ensaio ultrassônico (valores em GPa).

| Módulo        | Nível de preenchimento |        |        |
|---------------|------------------------|--------|--------|
|               | 80%                    | 90%    | 95%    |
| $E_1 (= E_2)$ | 2,2616                 | 2,0327 | 2,6330 |
| $E_3$         | 1,7633                 | 1,9386 | 3,0760 |

Fonte: Autoria própria (2024).

O módulo de elasticidade obtido da direção 1 pode ser comparado com o módulo obtido por meio de ensaios de tração utilizando as amostras com o formato mostrado na Figura 4. Os ensaios de tração foram conduzidos segundo a norma ASTM D638 (2023) em uma máquina de ensaio de tração universal com capacidade de carga máxima de 100 kN e equipada com vídeo extensômetro para a medição da deformação das amostras durante os testes. Os ensaios foram conduzidos até a ruptura das amostras e os módulos de elasticidade foram obtidos como sendo a inclinação da reta que relaciona a tensão aplicada e a deformação medida na região elástica do material. Os módulos de elasticidade obtidos nos ensaios de tração são mostrados no gráfico da Figura 7 juntamente com os valores obtidos pelo o ensaio ultrassônico.

**FIGURA 7.** Comparativo entre os módulos de elasticidade medidos por ultrassom e ensaio de tração.



Fonte: Autoria própria (2024).

O resultado comparativo apresentado na Figura 7 mostra que a diferença encontrada entre os valores de módulo de elasticidade obtidos pelas duas técnicas apresenta uma variação entre 2 e 17%. Tal resultado, demonstra a viabilidade da técnica ultrassônica na obtenção de constantes elásticas de materiais termoplásticos como PLA em amostras fabricadas por impressão 3D. Entretanto, novos estudos devem ser realizados para verificar a impossibilidade de obtenção de resultados mais robustos em função do nível de preenchimento das amostras.

#### 4. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo analisar os resultados da técnica ultrassônica na caracterização mecânica de corpos de prova de poliláctico (PLA) fabricados por manufatura aditiva. A caracterização mecânica ocorreu pela obtenção das constantes elásticas do material analisado e pelo cálculo do módulo de elasticidade para ser comparado com o obtido em ensaio de tração convencional. Através da análise comparativa, foi possível observar que a aplicação da técnica ultrassônica para caracterização é viável, uma vez que os módulos de elasticidade obtidos por ultrassom ficaram muito próximos aos valores encontrados via ensaio de tração. Vale salientar, que a técnica ultrassônica apresenta a grande vantagem de ser um ensaio não destrutivo, possibilitando menores custos na realização de testes e ensaios de caracterização de peças na indústria. Em trabalhos futuros, espera-se fabricar um número maior de amostras e realizar as mesmas medições para obtenção das constantes elásticas e verificar a variabilidade dos resultados. Com um número maior de amostras e consequentemente de medições, será possível aplicar técnicas de planejamento experimental como Fatorial Completo, Método Taguchi e Análise de superfície.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPQ (Processo número 409311/2018-9) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG (Processo número APQ-01789-18) pelo financiamento ao Projeto Pesquisa e pela bolsa de Iniciação Científica oferecida ao autor Diego Takeshi Kawaguchi.

#### DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ASTM INTERNATIONAL. ASTM D638: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2023.
- BITTENCOURT, M. R. de; FROZZA, Â. A. Filamentos de impressora 3D. Caderno Técnico Nº1 - IFC Camboriú – SC, 29 p., 2021.
- BOWER, A. F. Applied Mechanics of Solids. CRC Press, Boca Raton, EUA, 820p., 2009.
- CASTELLANO, A.; FOTI, P.; FRADDOSIO, A.; MARZANO, S.; PICCIONI, M. D. Mechanical characterization of CFRP composites by ultrasonic immersion tests: Experimental and numerical approaches. *Composites Part B: Engineering*, v. 66, p. 299–310, 2014.
- CREALITY. Ender-3 Pro 3D Printer. 2024. Disponível em:  
<https://www.creality.com/products/ender-3-pro-3d-printer>.
- HONARVAR, F.; VARVANI-FARAHANI, A. A review of ultrasonic testing applications in additive manufacturing: Defect evaluation, material characterization, and process control. *Ultrasonics*, v. 108, p. 106227, 2020.
- PEREIRA JUNIOR, P. Influência da anisotropia gerada por laminação sobre a medição de tensões por ultrassom em ligas de alumínio 7050. Dissertação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas, 137 p., 2011.
- RODRIGUEZ-SENDRA, J.; CARRION, A.; CAMARENA, F. Ultrasonic Measurement of Orthotropic Elastic Constants of 3D-Printed Photopolymer Materials. *IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, Veneza, Itália, p. 1-3, 2022.
- ROKHLIN, S. I.; WANG, W. Double through-transmission bulk wave method for ultrasonic phase velocity measurement and determination of elastic constants of composite materials. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 91, n. 6, p. 3303–3312, 1992.
- SANTANA, L.; ALVES, J. L.; SABINO NETTO, A. da C.; MERLINI, C. Estudo comparativo entre PETG e PLA para Impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 23, n. 4, 2018.
- ZENG, T.; WU, L.; GUO, L.; MA, L. A mechanical model of 3D braided composites with internal transverse crack. *Journal of Composite Materials*, v. 39, n. 4, p. 301–321, 2005.