

## CARACTERIZAÇÃO DE COMPONENTES FABRICADOS POR MANUFATURA ADITIVA USANDO ULTRASSOM

Diego T. Kawaguchi<sup>1</sup> (IC), Paulo P. Junior(PQ)<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá

**Palavras-chave:** Constantes elásticas. Manufatura Aditiva. Ultrassom.

### Introdução

A manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D, tem sido cada vez mais utilizada na indústria (RODRIGUEZ-SEANDRA, CARRION e CAMARENA, 2022), devido ao seu baixo custo na produção de componentes mecânicos quando comparado a outros métodos comumente utilizados. Os materiais mais utilizados comercialmente na impressão 3D são os termoplásticos, como o PLA (poliácido láctico). No processo de impressão 3D também é possível definir o grau de preenchimento da peça, podendo se usar menos material, tendo o mesmo formato, no entanto é necessário entender como essa mudança de preenchimento pode interferir na integridade estrutural e nas propriedades mecânicas do material.

Com isso, o objetivo do trabalho é realizar a caracterização dos componentes utilizando o ensaio por ultrassom em meio aquoso (CASTELLANO et al., 2014). Este tipo de caracterização possibilita menores custos por ser um ensaio não destrutivo. Para se obter as constantes elásticas do material são medidas a velocidade de propagação das ondas através do material e utilizada a equação de Christoffel (ROKHLIN e WANG, 1992). Através dos resultados obtidos, foi possível fazer a comparação com o ensaio de tração convencional (ASTM D628-14, 2014).

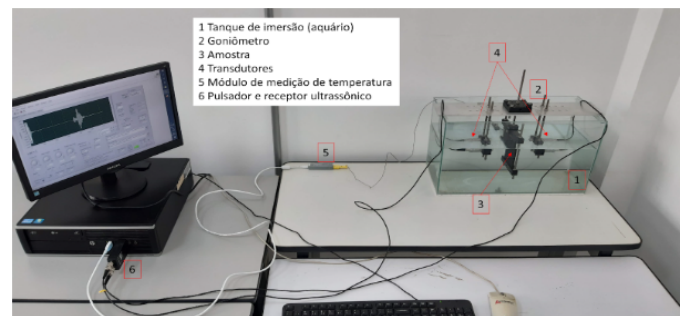
### Metodologia

Primeiramente, foi escolhido o material, no caso o PLA, devido às suas vantagens quando comparada a outros materiais, como maior rigidez, melhor acabamento superficial das peças e temperatura de fusão mais baixa (SANTANA, 2018).

Com a escolha do material, iniciou-se o processo de impressão 3D das peças, que foram impressas na impressora 3D do modelo Ender-3. As amostras têm dimensões de 100 x 100 x 6 mm e foram impressas com diferentes níveis de preenchimento, sendo de 75, 80, 85, 90, 95 %.

Com as amostras prontas, foi montado o sistema de caracterização por ondas ultrassônicas (Figura 1), este sistema permite a medição da velocidade da onda ultrassônica que é incidida no material em diferentes ângulos na amostra estudada (BOERI, 2006), sendo medida para cada amostra a velocidade da onda nos ângulos de 0 a 40°.

Figura 1 - Sistema de caracterização por ondas ultrassônicas



Com as medidas das velocidades, é utilizada a equação de Christoffel (Equação 1) e com o auxílio do software Matlab, são calculadas as constantes elásticas e com isso calculado o módulo de elasticidade do material pela Equação 2 (BOWER, 2009).

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

onde

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

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

$$p = a^2/3 - b;$$

$$q = d - ab/3 + 2(a/3)^3;$$

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

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

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

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

$$E_1 = \frac{(C_{11}C_{22}C_{33} + 2C_{23}C_{12}C_{13} - C_{11}C_{23}^2 - C_{22}C_{13}^2 - C_{33}C_{12}^2)}{(C_{22}C_{33} - C_{23}^2)}$$

$$E_2 = \frac{(C_{11}C_{22}C_{33} + 2C_{23}C_{12}C_{13} - C_{11}C_{23}^2 - C_{22}C_{13}^2 - C_{33}C_{12}^2)}{(C_{11}C_{33} - C_{13}^2)} \quad (2)$$

$$E_3 = \frac{(C_{11}C_{22}C_{33} + 2C_{23}C_{12}C_{13} - C_{11}C_{23}^2 - C_{22}C_{13}^2 - C_{33}C_{12}^2)}{(C_{11}C_{22} - C_{12}^2)}$$

Após a realização dos cálculos através do software MatLab se observou que as amostras com o preenchimento de 75 e 85% apresentaram resultados incoerentes, sendo assim descartados da pesquisa. Logo após foram realizados ensaios de tração nas amostras com preenchimentos de 80, 90 e 95%, para a comparação com os resultados do ensaio de ultrassom.

### Resultados e discussão

Os primeiros resultados obtidos foram as constantes elásticas, como podem ser observadas pela Tabela 1.

Tabela 1 - Constantes elásticas das amostras pelo ensaio de ultrassom

	80%	90%	95%
C11 = C22	2,8344	2,9567	3,2420
C33	2,2882	2,8510	3,7141
C44=C55	0,5251	0,5945	0,9361
C66	4,2653	3,2161	1,5476
C13 = C23	1,0036	1,4117	1,1890
C12	1,0036	1,4117	1,1890

Com os resultados obtidos das constantes elásticas, foi possível calcular o módulo de elasticidade como pode ser visto pela Tabela 2, que por se tratar de um material anisotrópico vai depender da direção.

Tabela 2 - Módulos de elasticidade das amostras pelo ensaio de ultrassom

	80%	90%	95%
E1 (GPa)	2,2616	2,0327	2,6330
E2 (GPa)	2,2616	2,0327	2,6330
E3 (GPa)	1,7633	1,9386	3,0760

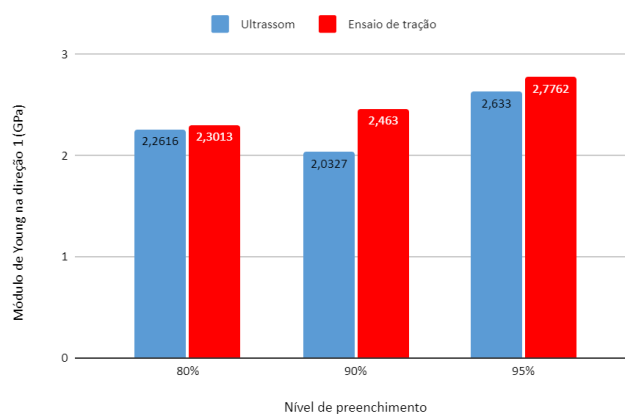
Então, foram feitos os ensaios de tração, na qual se obtiveram os resultados expressos pela Tabela 3.

Tabela 3 - Módulos de elasticidade das amostras por ensaio de tração

	80%	90%	95%
E1 (GPa)	2,3013	2,4630	2,7762

Por fim, para uma análise comparativa dos resultados obtidos foi feito o gráfico expresso pela Figura 2, que mostra a comparação dos módulos de elasticidade para cada preenchimento.

Figura 2 - Gráfico de comparação dos módulos de elasticidade



### Conclusões

Foi possível observar que a técnica utilizada de ensaio por ultrassom teve resultados bem próximos se comparado ao ensaio por tração convencional. Mostrando assim uma possível aplicação na caracterização de componentes fabricados por manufatura aditiva e utilização na caracterização de outros materiais anisotrópicos.

### Agradecimentos

Gostaria de agradecer toda minha família pelo apoio, o professor orientador Paulo Pereira Junior por todos os ensinamentos e dedicação durante o período de iniciação científica, a Unifei e a Fapemig por todo o apoio e estrutura para a realização desta pesquisa.

### Referências

J. Rodriguez-Sendra, A. Carrion, and F. Camarena, "Ultrasonic Measurement of Orthotropic Elastic Constants of 3D-Printed Photopolymer Materials," *IEEE Int. Ultrason. Symp. IUS*, vol. 2022-October, no. 3, pp. 2–4, 2022, doi: 10.1109/IUS54386.2022.9957208.

A. Castellano, P. Foti, A. Fraddosio, S. Marzano, and M. D. Piccioni, "Mechanical characterization of CFRP composites by ultrasonic immersion tests: Experimental and numerical approaches," *Compos. Part B Eng.*, vol. 66, pp. 299–310, 2014, doi: 10.1016/j.compositesb.2014.04.024.

S. I. Rokhlin and W. Wang, "Double through-transmission bulk wave method for ultrasonic phase velocity measurement and determination of elastic constants of composite materials," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 91, no. 6, pp. 3303–3312, 1992, doi: 10.1121/1.402847.

ASTM D638-14. ASTM International. Standard test method for tensile properties of plastics, 2014.

SANTANA, Leonardo et al. Estudo comparativo entre PETG e PLA para Impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 23, p. e12267, 2018.

BOERI, Daniel Verga. Caracterização de materiais compostos por ultra-som. 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BOWER, A. F. *Applied Mechanics of Solids*. Boca Raton: CRC Press, 2009. 820p.