

CARACTERIZAÇÃO POR ULTRASSOM DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS ELÁSTICAS DA LIGA DE TITÂNIO Ti6Al4V FABRICADA POR MANUFATURA ADITIVA PELO PROCESSO DE FUSÃO SELETIVA EM LEITO DE PÓ POR FEIXE DE ELÉTRONS (LPB-EBM).

Leandro Cardoso da Silva

Escola Politécnica da USP – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM – EPUSP, São Paulo - SP

Leandro.cardoso@sp.senai.br

Freddy Armando Franco Grijalba

Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica – FEM – UNICAMP, Campinas – SP.

freddy@unicamp.br

Auteliano Antunes dos Santos Júnior

Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica – FEM – UNICAMP, Campinas – SP.

aute@unicamp.br

Gilmar Ferreira Batalha

Escola Politécnica da USP – Dept. Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos – PMR EPUSP, São Paulo - SP

gfbatalh@usp.br

Resumo. A técnica de ultrassom é um tipo de ensaio não destrutivo versátil e relativamente de menor custo quando comparado a outros ensaios não destrutivos. Suas vantagens vão desde a capacidade de detectar imperfeições em diversos tipos de materiais, caracterizar a textura e até as caracterizações de suas propriedades elásticas. Porém, suas vantagens não se limitam a isto, pesquisas demonstram que, através das constantes de Murnaghan e da teoria da acustoelasticidade, é possível também determinar as tensões residuais presentes em diversos tipos de materiais, incluindo peças de fabricação aditiva de peças da liga Ti6Al4V grau 5 (dez vezes reciclado sem adição de pó virgem) pelo processo impressão 3D por fusão seletiva em leito de pó por meio de feixe de elétrons de próteses e insertos de aplicação biomédica, aeronáutica e aeroespacial. Isso tem aberto novas possibilidades de desenvolvimento de tecnologias Structural Health Monitoring (SHM). Neste trabalho foram obtidas as propriedades elásticas do material. Tais propriedades se aproximam da liga produzida por métodos tradicionais. Os resultados sugerem uma anisotropia nas constantes elásticas. Isso poderia ser causado por fatores não analisados, como a presença de tensões residuais ou não uniformidades diversas, demandando prosseguimento desta avaliação. As constantes foram calculadas considerando a densidade de um material livre de porosidade, e se prevê seguir investigando como a porosidade altera a densidade e, consequentemente, as constantes elásticas calculadas.

Palavras-chave: Manufatura aditiva, ultrassom, módulo de elasticidade, EBM, PBF, titânio, Ti6Al4V.

1. INTRODUÇÃO

A fabricação passou por um grande avanço e mudança tecnológica nos últimos anos. A fabricação tradicional depende de ferramentas e técnicas desenvolvidas e aprimoradas ao longo de várias décadas de fabricação de coisas. Do ponto de vista tecnológico, Manufatura envolve a fabricação de produtos a partir de matérias-primas através do uso de trabalho humano e recursos que incluem máquinas, ferramentas e instalações. poderia ser mais geralmente considerado como a conversão de um estado inutilizável em um estado utilizável, adicionando valor ao longo do caminho. Por exemplo, uma tora de madeira serve como matéria-prima para a fabricação de madeira serrada, que, por sua vez, é a matéria-prima para a produção de cadeiras. O valor adicionado é normalmente representado em termos de custo e/ou tempo. O termo manufatura tem origem no latim palavra *manufactus*, que significa feito à mão. A manufatura tem visto vários avanços nos últimos três séculos: a mecanização, a automação e, mais recentemente, a informatização levando ao surgimento da manufatura digital direta, popularmente conhecida como impressão 3D (BADIRU; VALENCIA; LIU, 2017).

A impressão 3D, também conhecida como manufatura aditiva ou manufatura digital direta, é um processo para fazer um objeto físico a partir de um modelo digital tridimensional, tipicamente estabelecendo muitas camadas finas sucessivas de um material (EDWARDS; O'CONNER; RAMULU, 2013; NAKAMURA et al., 2015; PALANIVEL et al., 2016; WANG et al., 2015). A estratificação sucessiva de materiais constitui a técnica de manufatura aditiva. Assim, o termo a fabricação digital direta decorre do processo de passar de um projeto digital de um produto a um produto físico acabado. Os fabricantes podem usar a impressão 3D para fazer protótipos de produtos antes de ir para a produção completa. Em

ambientes educacionais, professores e alunos usam esse processo para fazer protótipos relacionados ao projeto. Código aberto e impressoras 3D de consumo permitem a criação de produtos em casa, avançando assim o conceito de manufatura aditiva distribuída. Orientada para a defesa e aeroespacial produtos são particularmente viáveis para a aplicação de impressão 3D. Os militares frequentemente operam em regiões remotas do mundo, onde a substituição rápida de peças pode ser difícil de realizar. Com impressão 3D, produção rápida de peças de reposição de rotina pode ser obtido a baixo custo no local para atender às necessidades urgentes. A engenharia civil militar comunidade é particularmente fértil para a aplicação de impressão 3D para ativos militares fins de gestão (GALARRAGA et al., 2016; HILDRETH et al., 2016; KEMPEN et al., 2013; LIU et al., 2011).

Esta pesquisa utilizou a tecnologia de manufatura aditiva por feixe de elétrons, conhecida mundialmente pela sigla inglesa *EBM - Electron Beam Melting*, e os tipos de materiais que podem ser processados incluem aço, aço inoxidável, cromo cobalto, titânio e alumínio e caracteriza-se por um processo que utiliza o pó que se distingue pela sua precisão superior e feixe de elétrons de alta potência (até 3000 W, mantendo a velocidade de varredura) que gera a energia necessária para alta capacidade de fusão e alta produtividade (GALARRAGA et al., 2016).

O ultrassom é um método de ensaio não destrutivo muito versátil e relativamente barato quando comparado a outras técnicas como por exemplo raios-x. Suas vantagens vão desde a capacidade de detectar imperfeições em diversos tipos de materiais, caracterizar a textura e até as caracterizações de suas propriedades elásticas. De acordo com HUGHES e KELLY (1953), suas vantagens não se limitam a isto, pesquisas demonstram que, através das constantes de Murnaghan, e da teoria da acustoelasticidade, é possível também determinar as tensões residuais presentes em diversos tipos de materiais, incluindo compósitos e tecnologia aditiva. Isso tem aberto novas possibilidades de desenvolvimento de tecnologias Structural Health Monitoring (SHM) (PAO, 1987).

Na acústica aplicada em inspeção, é preciso considerar que existem dois modos básicos de ondas, as longitudinais e cisalhantes. As ondas longitudinais são representadas na Figura 1 (a); neste tipo a onda se propaga na mesma direção da vibração (polarização) das partículas. Já as ondas cisalhantes, que são representadas na Figura 1 (b), a propagação da onda ocorre no sentido perpendicular das partículas (polarização).

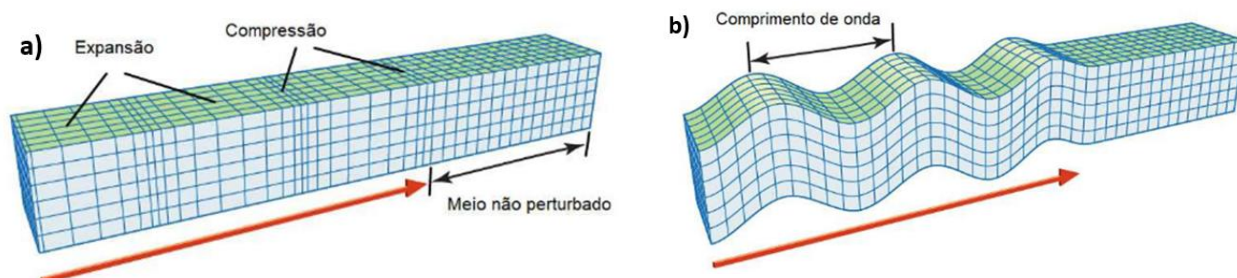


Fig 1. Ondas: a) Ondas Longitudinais, b) Onda Cisalhante. (BOLT, 2018)

Para levar essa diferença em conta, as velocidades citadas neste trabalho possuirão dois índices, o primeiro no sentido da propagação da onda e o segundo no sentido de polarização da onda. Sendo assim V_{xx} , V_{yy} e V_{zz} são ondas longitudinais e V_{xy} , V_{xz} , V_{yx} , V_{yz} , V_{zx} , V_{zy} , ondas cisalhantes.

A proposta das medições será explicada a seguir e tem por finalidade obter as constantes elásticas de uma liga de titânio Ti6Al4V fabricado por manufatura aditiva mediante fusão seletiva em leito de pó metálico por feixe de elétrons. Para isto não serão considerados os efeitos da porosidade, textura e tensões residuais, que serão investigados em trabalhos posteriores.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

No processo de manufatura aditiva PBF-EBM, o feixe de elétrons é usado como fonte de calor para derreter o pó. Normalmente, o feixe de elétrons funciona nominalmente com uma tensão de aceleração de 60 kV para fornecer uma densidade de energia no feixe focalizado superior a 106 kW/m^2 (100 kW/cm^2). Na Figura 2 é ilustrado um diagrama esquemático do processo PBF-EBM (100 kW/cm^2) (BADIRU; VALENCIA; LIU, 2017; KEIST; PALMER, 2016; MOHAMMADHOSSEINI, 2015; SOUNDARAPANDIYAN et al., 2021).

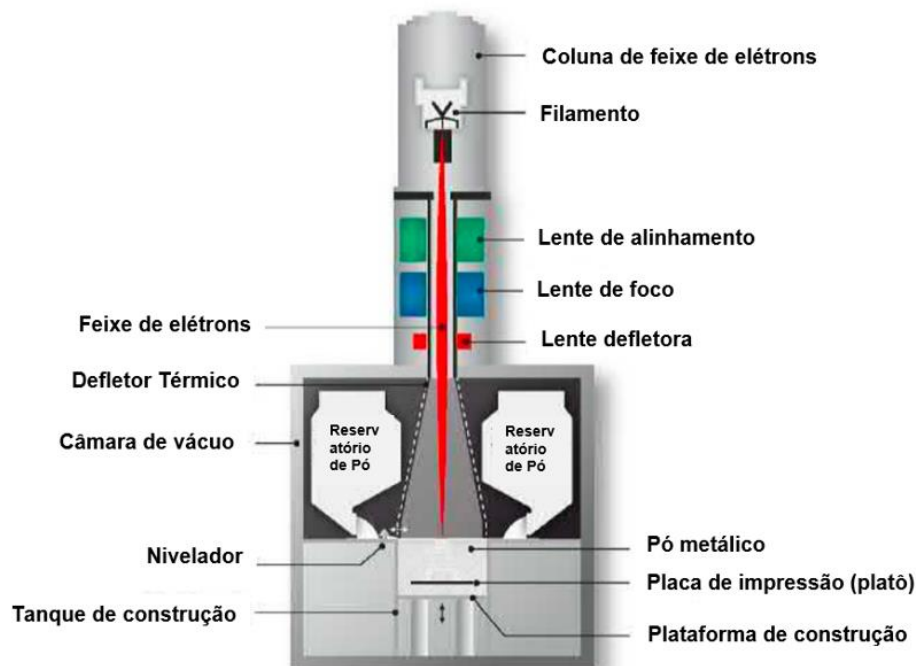


Fig 2. Impressora PBF-EBM ARCAM Q10 (MOHAMMADHOSSEINI, 2015)

As micrografias dos pós virgens e reciclados são mostradas na figura 3 (a) e 3 (b), respectivamente. Em ampliação menor (figura 3 a), ambos os pós parecem semelhantes. A maioria das partículas é esférica com algumas características comuns geralmente encontradas em pós tipo satélite, com alongamentos e partículas de formato irregular, aglomerados e partículas com poros abertos, conforme indicado pelas setas amarelas. No entanto, uma diferença distinta na morfologia da superfície do pó pode ser vista em alta ampliação.

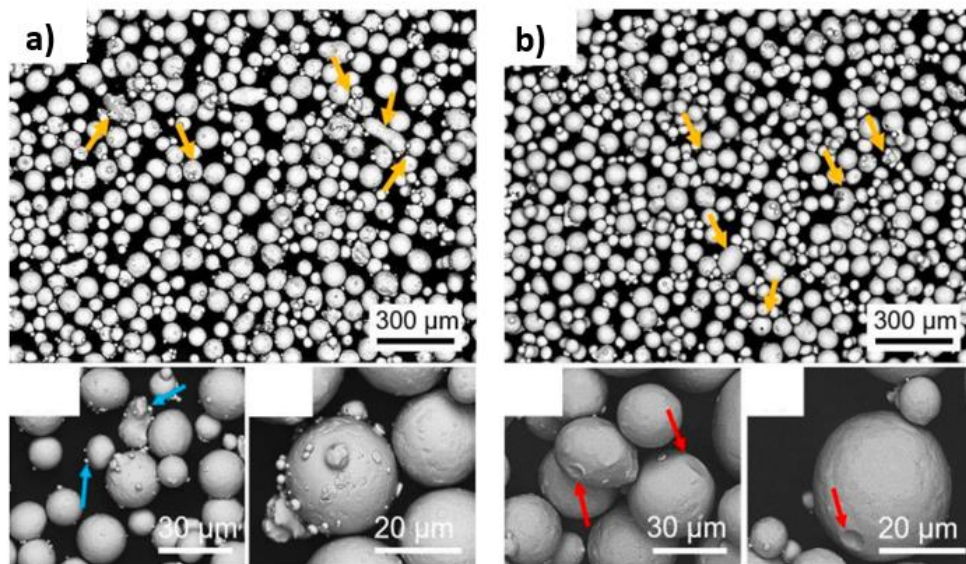


Fig 3. (a) Pó virgem, (b) Pó reciclado. (SOUNDARAPANDIYAN et al., 2021)

O pó virgem, figura 3 (a), contém um número significativo de partículas finas (indicadas por setas azuis) ligadas a partículas mais grossas. Em comparação, o pó reciclado mostra crateras (depressões rasas) e concavidades (depressões mais profundas) na superfície do pó, conforme indicado pelas setas vermelhas na Figura 3 (b) (SOUNDARAPANDIYAN et al., 2021). A Figura 4 mostra as diferentes interações entre o feixe de elétrons e a matéria-prima em pó virgem e reciclado (COLE et al., 2009; MEENA et al., 2021; MELTING et al., 2022; PALANIVEL et al., 2016; PECK et al., 2018; PETROVIC; NIÑEROLA, 2015).

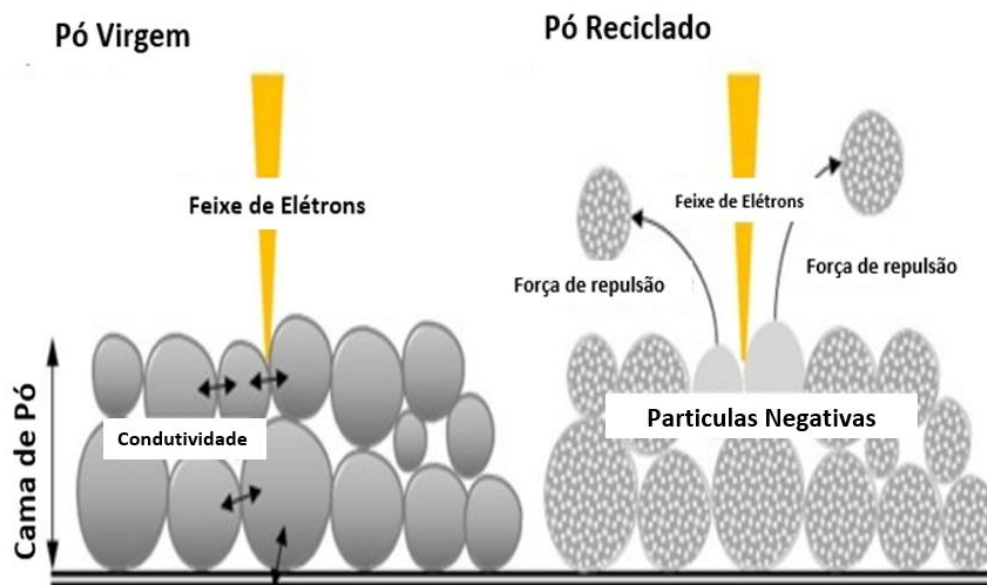


Fig 4. Diferentes interações entre o feixe de elétrons e a matéria-prima em pó virgem e reciclado (MELTING et al., 2022).

Foram fabricadas 3 amostras para caracterização por ultrassom conforme figura 5.

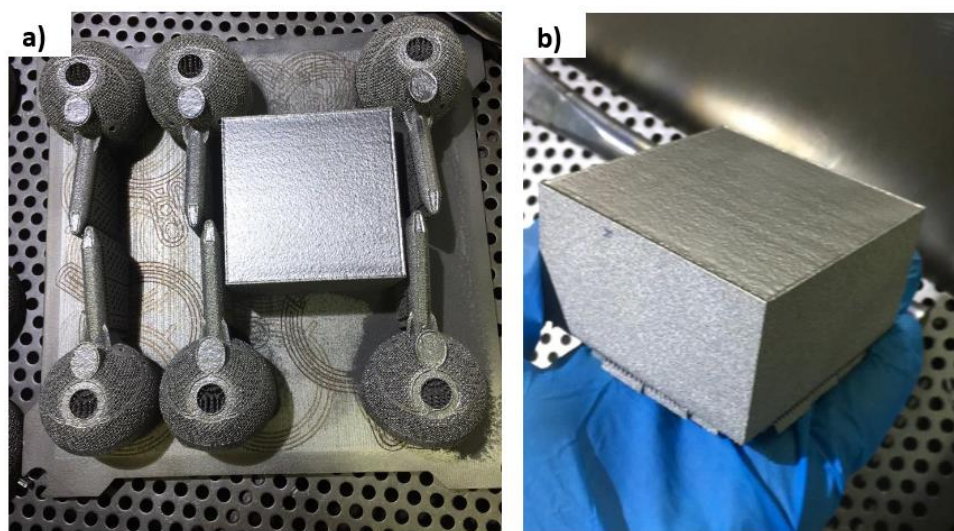


Fig 5. (a) Impressão do cubo para análise de ultrassom na impressora MA ARCAM Q10 EBM utilizando pó reciclado por seis vezes, (b) Imagem do cubo antes do envio ao processo de usinagem. (Autor, 2022)

2.1 Equacionamento da medição das constantes elásticas pela técnica de feixes de ultrassom

O módulo de elasticidade (Módulo de Young), o módulo de cisalhamento, e o coeficiente de Poisson podem ser relacionados com as velocidades de ondas ultrassônicas cisalhantes e longitudinais, conforme mostram as equações (1) a (3), conforme esquematizado na Figura 2 (SOL et al., 2018; TEVET; YEHESEKEL, 2002; YEHESEKEL; TEVET, 1999).

$$E = \frac{\rho V_{ij}^2 (3V_{ii}^2 - 4V_{ij}^2)}{(V_{ii}^2 + V_{ij}^2)} \quad (1)$$

$$G = \rho V_{ij}^2 \quad (2)$$

$$E = \frac{(3V_{ii}^2 - 4V_{ij}^2)}{2(V_{ii}^2 + V_{ij}^2)} \quad (3)$$

Nas equações anteriores, E é o módulo de elasticidade, G é o módulo de cisalhamento, ν é coeficiente de Poisson, ρ é a densidade, V_{ii} velocidade da onda longitudinal na direção de propagação i e polarização i , e V_{ij} velocidade da onda cisalhante na direção i e polarização em j .

Com as medições feitas através da técnica de ultrassom temos VT sendo a velocidade transversal e VL a velocidade longitudinal, com isto as propriedades elásticas podem ser calculadas através das equações 4, 5, 6 e 7 respectivamente:

1. Coeficiente de Poisson:

$$\mu = \frac{V_L^2 - 2V_T^2}{2(V_L^2 - V_T^2)} \quad (4)$$

2. Modulo de Rigidez

$$G = \rho V_T^2 \quad (5)$$

3. Módulo de Young

$$E = 2G(1 + \mu) \quad (6)$$

4. Módulo Volumétrico

$$B = \frac{E}{3(1 - 2\mu)} \quad (7)$$

2.2 Equipamentos da medição das constantes elásticas pela técnica de feixes de ultrassom

Para as medições do tempo de percurso das ondas longitudinais e cisalhantes foi utilizada a técnica de ensaios de ultrassom por transmissão “troughth-transmission”, que consiste em posicionar dois transdutores em duas faces paralelas, sendo que um transdutor emite a onda que se propaga através do material e o outro tem a função de captar a onda após ela atravessar a amostra, conforme ilustrado na Figura 3. Os equipamentos utilizados nas medições possuem a seguinte configuração, mostrada na Figura 4:

- Computador com o programa Labview® para comunicação entre equipamentos e processamento dos sinais.
- Pulsador receptor Ultratek USB-UT350 com taxa de amostragem de 50 MHz.
- Dois pares de transdutores de emissão e recepção dos sinais ultrassônicos. Sendo um de onda longitudinal de 1 MHz, e outro de onda cisalhante de 2,25 MHz.

2.2.1 Procedimentos experimental da medição das constantes elásticas pela técnica de feixes de ultrassom

A amostra analisada é um cubo de material Titânio grau 5 (Ti 6Al 4V – reciclado) produzido por tecnologia de manufatura aditiva por feixe de elétrons (EBM), que após a sua fabricação foi retificado para criar uma superfície adequada para a medição, conforme informado pelo fabricante. Cada face da amostra foi dividida em nove regiões, o mapeamento da amostra e os eixos de referência que serão utilizados para descrever o sentido de propagação da onda e sua polarização são apresentados na Figura 5.

Em cada face é possível realizar três medições do tempo de propagação das ondas, uma longitudinal (onda-P) e duas cisalhantes (onda-SH e onda-SV). Em outras palavras e tomando como exemplo a face X, os modos de ondas possíveis são: a onda longitudinal se propaga na direção X e é polarizada em X, a onda cisalhante que se propaga em X polarizada na direção Y, a onda cisalhante que se propaga na direção X e é polarizada em Z.

Para as medições do tempo de onda longitudinal e das duas ondas cisalhantes foram realizadas nove posições de cada face, com três repetições em cada uma das posições, totalizando 81 medições por face.

Para a medição das dimensões do cubo utilizou-se de um paquímetro digital Digimess® de capacidade para medição de 200 mm e resolução de 0,01. mm, realizando cinco repetições em cada uma das direções, totalizando 15 medições.

Por fim, as velocidades foram calculadas dividindo as dimensões pelos tempos de percurso de cada um dos tipos de onda. Estes valores foram aplicados nas equações Equação 1, Equação 2 e Equação 3. Todas as medições foram realizadas em ambiente com controle de temperatura por ar-condicionado, a 20°C.

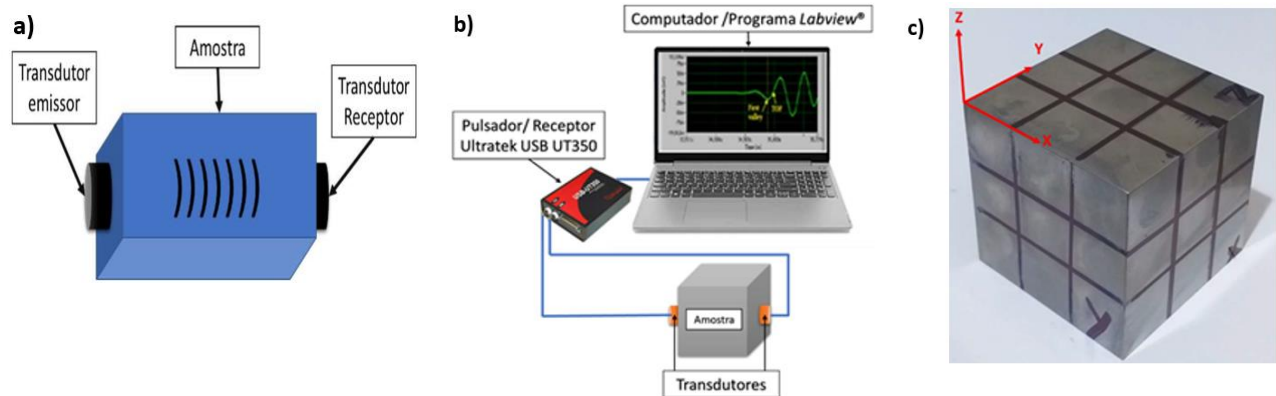


Fig 6. (a) Técnica “through-transmission” para ondas longitudinais e cisalhantes, (b) Sistema de medição utilizado, (c) Mapeamento da amostra usinada e eixos de referência. (Autor, 2022)

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.

Outro fator que pode influenciar a velocidade de propagação das ondas acústicas é a textura e granulometria da peça, conforme relatado em trabalhos anteriores (BRAY; TANG, 2001; DOS SANTOS). No entanto, essa análise não faz parte do escopo dessas medições. É importante destacar que esses efeitos podem não ocorrer da mesma forma em peças impressas, como é o caso do material estudado.

Os resultados apresentados na Tabela 1 mostram que as velocidades das ondas cisalhantes são diferentes dependendo da direção de propagação e polarização, o que indica uma anisotropia nesse sentido. Essa anisotropia pode ser resultado de diferentes fatores, como a presença de tensões residuais ou não uniformidades diversas no material. Porém, é necessário realizar estudos mais aprofundados para confirmar essas hipóteses.

Tabela 1 – Resultados das velocidades longitudinais e transversais.

	Propagação X	Propagação Y	Propagação Z
Polarização X	5640 ± 16 (m/s)	3206 ± 8 (m/s)	3218 ± 9 (m/s)
Polarização Y	3256 ± 8 (m/s)	5635 ± 8 (m/s)	3234 ± 18 (m/s)
Polarização Z	3217 ± 6 (m/s)	3260 ± 9 (m/s)	5629 ± 11 (m/s)

Já as velocidades das ondas longitudinais não apresentam diferenças significativas dependendo da direção de propagação e polarização, o que sugere que o material é isotrópico nesse sentido. Isso é um resultado importante, uma vez que as propriedades elásticas são uma característica fundamental dos materiais e podem influenciar em seu comportamento em diferentes situações.

A polarização se refere à direção de vibração das partículas do material quando uma onda acústica é transmitida através dele. Essa direção pode ser paralela ou perpendicular à direção de propagação da onda. No caso das ondas longitudinais, as partículas se movem na mesma direção da propagação da onda, ou seja, a polarização e a direção de propagação são paralelas. Já nas ondas cisalhantes, as partículas se movem perpendicularmente à direção de propagação da onda, ou seja, a polarização e a direção de propagação são perpendiculares.

Ao medir as velocidades das ondas longitudinais e cisalhantes em diferentes direções de polarização e propagação, é possível obter informações sobre a anisotropia do material, ou seja, sobre como as propriedades elásticas variam em diferentes direções (BRAY, 2002; EGGLE; BRAY, 1976).

Os resultados apresentados neste trabalho experimental podem contribuir para análises computacionais, como a análise por elementos finitos estrutural, que é uma técnica utilizada para prever o comportamento de estruturas em diferentes situações. Com os dados de velocidade das ondas acústicas, é possível determinar as constantes elásticas do material e utilizá-las na análise por elementos finitos. Além disso, outros dados de outras pesquisas, como curva de tensão deformação e curva S-N de fadiga, também podem ser utilizados em conjunto para uma análise mais completa do comportamento do material.

Em suma, os resultados apresentados neste trabalho indicam a presença de uma anisotropia nas constantes elásticas do material, principalmente nas ondas cisalhantes. Essa anisotropia pode ser resultado de diferentes fatores, como a presença de tensões residuais ou não uniformidades diversas no material. Porém, é necessário realizar estudos mais aprofundados para confirmar essas hipóteses. Além disso, os resultados podem contribuir para análises computacionais, como a análise por elementos finitos estrutural, reunindo outros dados de outras pesquisas para uma análise mais completa do comportamento do material.

3.2 Propriedades elásticas do material.

As propriedades elásticas do material foram obtidas aplicando as equações Equação 1, Equação 2 e Equação 3 com os resultados das velocidades que foram apresentados na Tabela 1. A literatura relata que é aceitável utilizar um coeficiente que considera a porcentagem de porosidade do material, que leva a redução a densidade do material. Como consequência, as propriedades elásticas também seriam alteradas. Entretanto, para estas medições considerou-se a densidade completa do material, ou seja, $\rho = 4500 \text{ kg/m}^3$.

Para o cálculo dos módulos elásticos, foram analisadas todas as faces, considerando as duas velocidades de ondas cisalhantes (SOL et al., 2018). Os resultados são apresentados na Tabela 2, a seguir.

Tabela 2 – Valores medidos das constantes elásticas. (Autor, 2022)

Coord.	Módulo Cisalhamento (GPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson (adimensional)
XY	47,71	119,27	0,25
XZ	46,57	117,25	0,26
YX	46,25	116,62	0,26
YZ	47,82	119,41	0,25
ZX	46,60	117,18	0,26
ZY	47,06	118,00	0,25

CONCLUSÕES.

Foram obtidas as propriedades elásticas de um material através de métodos tradicionais, e os resultados indicam uma anisotropia nas constantes elásticas. No entanto, há fatores que podem ter contribuído para essa anisotropia, como a presença de tensões residuais ou não uniformidades diversas. Para entender esses fatores com mais profundidade, será necessário um estudo mais aprofundado.

As constantes elásticas foram calculadas com base na densidade de um material livre de porosidade, que é um método utilizado por alguns autores. No entanto, para se obter resultados mais consistentes com o que é previsto na literatura, seria necessário considerar que a porosidade reduz a densidade e pode afetar as constantes elásticas calculadas usando as equações de 1 a 3.

Os resultados experimentais obtidos neste trabalho podem ser úteis para análises computacionais, como análises por elementos finitos estruturais, quando combinados com outros dados de pesquisa, como curvas de tensão-deformação e curvas S-N de fadiga. Esses dados podem ser valiosos para projetos de engenharia, ajudando a prever o comportamento do material em diferentes situações e a tomar decisões informadas sobre o uso do material em projetos específicos.

Por fim, os resultados deste trabalho fornecem informações importantes sobre as propriedades elásticas do Titânio Ti6Al4V grau 5 fabricado pela tecnologia de manufatura aditiva, mas também destacam a importância de considerar a influência de fatores adicionais, como a porosidade, no cálculo dessas propriedades. Além disso, os resultados podem ser úteis em aplicações de engenharia, quando combinados com outras informações relevantes para a análise estrutural.

4. REFERÊNCIAS

- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM E44-84 Definitions of Terms Relating to Heat Treatment of Metals. ASTM-E44-84 ed. [s.l.] Annual Book of ASTM Standards, 1984.
- BADIRU, A.; VALENCIA, V. V.; LIU, D. Additive Manufacturing Handbook - Product Development for the Defense Industry. Dayton, Ohio: CRC Press, 2017.
- BOLT, B. Earthquake. England: Encyclopedia Britannica, 2018. (Nota técnica).
- BRAY, D. E.; TANG, W. Subsurface stress evaluation in steel plates and bars using the L CR ultrasonic wave Nuclear Engineering and Design. USA: [s.n.]. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/nucengdes>.
- CASTELLANO, A. et al. Ultrasonic characterization of components manufactured by direct laser metal deposition. Materials, v. 13, n. 11, 1 jun. 2020.
- COLE, C. D. et al. Comparison of low back fusion techniques: Transforaminal lumbar interbody fusion (TLIF) or posterior lumbar interbody fusion (PLIF) approaches. Current Reviews in Musculoskeletal Medicine, v. 2, n. 2, p. 118–126, 2009.
- DOS SANTOS, A. A.; BRAY, D. E. Comparison of acoustoelastic methods to evaluate stresses in steel plates and bars. Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME, v. 124, n. 3, p. 354–358, ago. 2002.
- EDWARDS, P.; O'CONNER, A.; RAMULU, M. Electron Beam Additive Manufacturing of Titanium Components: Properties and Performance. Journal of Manufacturing Science & Engineering, v. 135, p. 1–8, 2013.
- EGLE, D. M.; BRAY, D. E. Measurement of acoustoelastic and third-order elastic constants for rail steel. Journal of the Acoustical Society of America, v. 60, n. v3, p. 741–744, 1976.

- FRAZIER, W. E. Metal additive manufacturing: A review. *Journal of Materials Engineering and Performance* Springer New York LLC, 2014.
- GALARRAGA, H. et al. Effects of the microstructure and porosity on properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM). *Additive Manufacturing*, v. 10, p. 47–57, 2016.
- HILDRETH, O. J. et al. Dissolvable metal supports for 3D direct metal printing. *3D Printing and Additive Manufacturing*, v. 3, n. 2, p. 91–97, 2016.
- HUGHES, D. S.; KELLY, J. L. Second-Order Elastic Deformation of Solids. *Physical Review*, v. 92, p. 1–93, 1953.
- KEIST, J. S.; PALMER, T. A. Role of geometry on properties of additively manufactured Ti-6Al-4V structures fabricated using laser based directed energy deposition. *Materials and Design*, v. 106, p. 482–494, 2016.
- KEMPEN, K. et al. Producing crack-free, high density M2 HSS parts by Selective Laser Melting: Pre-heating the baseplate. 24th International SFF Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2013, p. 131–139, 2013.
- LIU, B. et al. Investigaztion the effect of particle size distribution on processing parameters optimisation in selective laser melting process. 22nd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2011, n. mm, p. 227–238, 2011.
- MEENA, V. K. et al. Additive manufacturing for metallic spinal implants: A systematic review. *Annals of 3D Printed Medicine*, v. 3, p. 100021, 2021.
- MELTING, E. et al. Rheological Behavior of Inconel 718 Powder for Electron-Beam Melting. *Metals*, 2022.
- MOHAMMADHOSSEINI, A. Properties and Performance of Titanium alloy Processed by Electron Beam Melting Additive Manufacturing. Thesis—[s.l.] Swinburne University of Technology, 2015.
- NAKAMURA, H. et al. Elucidation of melt flows and spatter formation mechanisms during high power laser welding of pure titanium. *Journal of Laser Applications*, v. 27, n. 3, p. 032012, ago. 2015.
- PALANIVEL, S. et al. Spatially dependent properties in a laser additive manufactured Ti-6Al-4V component. *Materials Science and Engineering A*, v. 654, p. 39–52, 2016.
- PAO, Y.-H. THEORY OF ACOUSTOELASTICITY AND ACOUSTOPLASTICITY. *Solid mechanics research for quantitative non-destructive evaluation*, p. 257–273, 1987.
- PECK, J. H. et al. Mechanical performance of lumbar intervertebral body fusion devices: An analysis of data submitted to the Food and Drug Administration. *Journal of Biomechanics*, v. 78, p. 87–93, 2018.
- PETROVIC, V.; NIÑEROLA, R. Powder recyclability in electron beam melting for aeronautical use. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, v. 87, n. 2, p. 147–155, 2015.
- SOL, T. et al. Nondestructive ultrasonic evaluation of additively manufactured AlSi10Mg samples. *Additive Manufacturing*, v. 22, p. 700–707, 1 ago. 2018.
- SOUNDARAPANDIYAN, G. et al. The effects of powder reuse on the mechanical response of electron beam additively manufactured Ti6Al4V parts. *Elsevier*, p. 36, 2021.
- TEVET, O.; YEHESEKEL, O. Quantitative Non-Destructive Evaluation (QNDE) of the Elastic Moduli of Porous Al₂O₃. *Key Engineering Materials*, v. 224–226, p. 835– 0, jun. 2002.
- WANG, T. et al. Grain morphology evolution behavior of titanium alloy components during laser melting deposition additive manufacturing. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 632, p. 505–513, 2015.
- YEHESEKEL, O.; TEVET, O. Elastic Moduli of Transparent Ytria. *J. Am. Ceram. Soc.*, v. 82, p. 136–144, 1999.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

ULTRASOUND CHARACTERIZATION OF THE ELASTIC MECHANICAL PROPERTIES OF TITANIUM ALLOY Ti6Al4V MANUFACTURED BY ADDITIVE MANUFACTURE BY THE ELECTRON BEAM POWDER BED SELECTIVE FUSION PROCESS (LPB-EBM).

Leandro Cardoso da Silva

Escola Politécnica da USP – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM – EPUSP, São Paulo - SP

Leandro.cardoso@sp.senai.br

Freddy Armando Franco Grijalba & Auteliano Antunes dos Santos Júnior

Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica – FEM – UNICAMP, Campinas – SP.

freddy@unicamp.br

Gilmar Ferreira Batalha

Escola Politécnica da USP – Dept. Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos – PMR EPUSP, São Paulo - SP

gfbatalh@usp.br

Summary. *The ultrasound technique is a versatile and relatively less costly type of non-destructive test when compared to other non-destructive tests. Its advantages range from the ability to detect imperfections in various types of materials, characterize the texture and even the characterizations of its elastic properties. However, its advantages are not limited to this, research shows that, through Murnaghan constants and the acoustoelastic methods, it is also possible to determine the residual stresses present in various types of materials, including additive parts of Ti6Al4V grade 5 (ten times recycled without adding virgin powder) alloy parts by the process 3d printing by selective fusion in powder bed by means of electron beam of prostheses and inserts of biomedical application, aeronautics and aerospace. This has opened new possibilities for developing Structural Health Monitoring (SHM) technologies. In this work, the elastic properties of the material were obtained. Such properties approach the alloy produced by traditional methods. The results suggest anisotropy in elastic constants. This could be caused by unanalyzed factors, such as the presence of residual stresses or not different uniformities, demanding the continuation of this evaluation. The constants were calculated considering the density of a porosity-free material, and it is expected to continue investigating how porosity alters density and, consequently, the calculated elastic constants.*

Keywords: *Additive manufacturing, ultrasound, modulus of elasticity, EBM, GMP, titanium, Ti6Al4V.*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.