

# Estudo de propriedades mecânicas e micro dureza de uma liga de Ti-6Al-4V manufaturada por SLM

Study of plastic behaviour and Vicker hardness of a Ti-6Al-4V alloy manufactured by SLM

João Alves<sup>1</sup> | Teresa Morgado<sup>2</sup> | Ivan Galvão<sup>3</sup> | António Pereira<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ISEL-Instituto Superior de Engenharias de Lisboa

<sup>2</sup> ISEL-Instituto Superior de Engenharias de Lisboa; UNIDEMI-Unidade de Investigação e Desenvolvimento em Engenharia Mecânica e Industrial da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa; CINAV-Centro de Investigação Naval, Marinha Portuguesa.

<sup>3</sup> ISEL-Instituto Superior de Engenharias de Lisboa; CEMMPRE- Centro de Engenharia Mecânica, Materiais e Processos da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

<sup>4</sup> CDRsp & ESTG- Centro para o Desenvolvimento Rápido e Sustentável de Produto & Escola Superior de Gestão e Tecnologia do Instituto Politécnico de Leiria.

## resumo

O presente estudo tem como objetivos a determinação das propriedades mecânicas e da microdureza Vicker de uma liga de Ti-6Al-4V. Neste artigo é apresentado todo o trabalho experimental desde a obtenção dos provetes da liga de titânio, por *Selective Laser Melting*, até aos ensaios mecânicos e de microdureza Vicker. Chegou-se à conclusão que o ciclo de preparação e acondicionamento de pós neste processo é crucial para a obtenção do material. Obtiveram-se as propriedades mecânicas elásticas e plástica, culmatando a inexistência de resultados na comunidade científica, nomeadamente referentes aos valores do expoente de ductilidade, do coeficiente de resistência, da resiliência e da tenacidade. Do estudo da microdureza concluiu-se que os valores obtidos na secção transversal é 5,65% superior ao da secção longitudinal.

**Palavras-chave:** Ti-6Al-4V, *Selective Laser Melting*, Propriedades Plásticas, Dureza.

## abstract

This study aims to determine the mechanical properties and Vicker microhardness of a Ti-6Al-4V alloy. This article presents all the experimental work from titanium alloy specimens manufacturing by *Selective Laser Melting* to the mechanical and Vicker microhardness tests. The additive manufacturing parameters were studied. It was concluded that the powder preparation and conditioning cycle in this process is crucial to obtaining the material. Elastic and plastic mechanical properties were obtained to fill the gap in the scientific community, particularly concerning values for the ductility exponent, strength coefficient, resilience, and toughness. From the microhardness study, it was concluded that the values obtained in the cross-section are 5.65% higher than in the longitudinal section.

**Keywords:** Ti-6Al-4V, *Selective Laser Melting*, Plastic properties, Hardness.

# 1- INTRODUÇÃO

O *Selective Laser Melting* (SLM) é um processo de impressão tridimensional que utiliza um laser de alta potência para fundir e solidificar camadas sucessivas de pó metálico a uma precisão de micrómetros. Durante o seu funcionamento, um feixe de laser é direcionado para uma camada fina de metal em pó, onde a energia, é concentrada de forma seletiva, de acordo com as áreas do padrão desejado. Permitindo assim a obtenção das mais variadas geometrias complexas, com a geral redução do tempo necessário à obtenção de um componente final [1-2]. Este processo utiliza como principais parâmetros: a potência laser que é definida como a quantidade energia por segundo em kW; a velocidade de passagem do raio laser em mm/s; a espessura de cada camada de pó em mm, que o laser terá de fundir e, a distância em mm entre o centro dos cordões. A Fig. 1, apresenta o esquema de ilustrativo destes parâmetros.

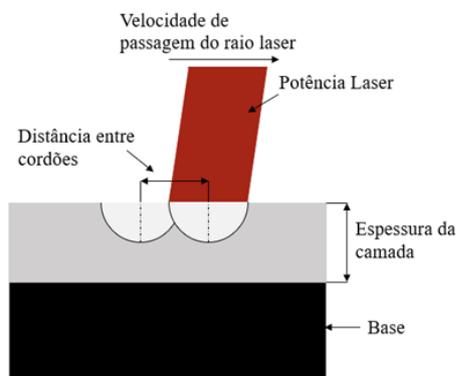


Fig. 1 | Parâmetros de fabrico do SLM.

Contudo, a maior parte dos equipamentos de impressão tridimensional SLM, subdividem o processo em camadas e cordões, com o intuito de melhorar o acabamento superficial das geometrias, otimizar o escoamento de calor, e obter boas propriedades mecânicas. No que refere à localização dos cordões, os mesmos podem pertencer ao limite da camada e como tal denominam-se de *Borders* (*Border* e *Following Border*) ou pertencer ao meio da camada e têm a denominação de *Hatch Vector* [3]. Na Fig. 2, está representado um esquema exemplificativo do processo de uma camada de cordões.

No que concerne às camadas, estas podem ser subdivididas em 4 zonas: *Up-skin*, *In-skin*, *Down-skin* e *Solid support* [3]. Na Fig. 3. apresenta a esquematização das camadas de cordão durante a manufatura do componente. A Fig. 3. a) apresenta as três camadas distintas designadas por *Solid support*, *Down-skin* e *In-skin*) e a Fig. 3. b) representa a zona superior *In-skin* e *Up-skin*.

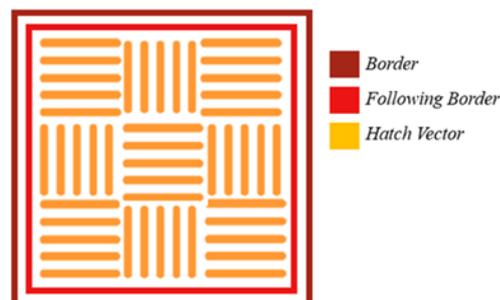


Fig. 2 | Esquema ilustrativo da nomenclatura dada a cada cordão

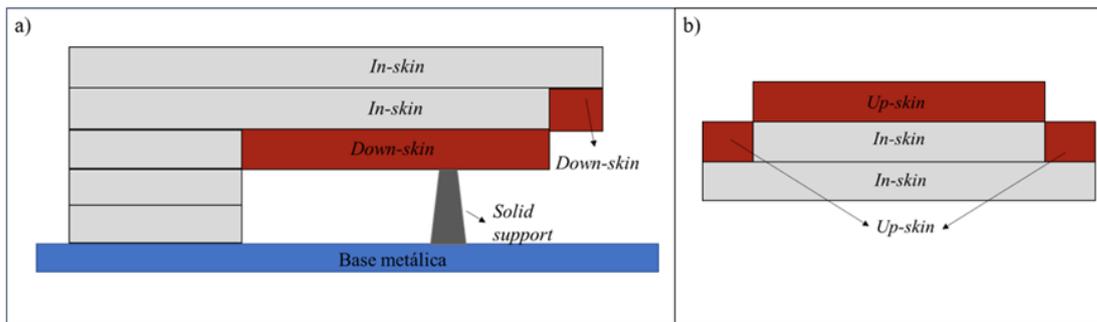


Fig. 3 | Esquema ilustrativo da nomenclatura dada a cada camada: a) *Solid support*, *Down-skin* e *In-skin*; b) *In-skin* e *Up-skin*.

O processo de manufatura aditiva SLM, irá conferir novas propriedades aos materiais fabricados, nomeadamente na liga Ti-6Al-4V. Em relação à microestrutura, irá traduzir-se no aparecimento de estruturas martensítica, denominadas de  $\alpha'$ , que são habitualmente mais frágeis, uma vez que as quantidades de calor transmitidas num ponto focal são elevadas (taxas de arrefecimento  $> 410^{\circ}\text{C}$ ) [4-5]. O crescimento do grão é orientado pela direção de fabrico, e por consequência vai alterar o comportamento mecânico do material, nomeadamente na propagação de fenda. Os defeitos intrínsecos ao SLM são porosidades que promovem a descontinuidade na matriz metálica [6-7].

Na última década têm surgido vários estudos [5, 6, 8-15] que caracterizaram o comportamento mecânico da liga de Ti-6Al-4V produzidos por SLM, sem tratamento térmico. A tabela 1 apresenta um resumo das propriedades mecânicas, tensão de cedência e de rotura, módulo de Young e dureza.

Contudo, no que trata a caracterização do comportamento plástico da liga Ti-6Al-4V manufaturada por SLM os autores não encontraram informação. Por conseguinte, este trabalho tem como principal objetivo a determinação experimental do comportamento plástico da liga de Ti-6Al-4V, produzida por SLM sem tratamento térmico, através da determinação do expoente de encruamento ( $n$ ) e do coeficiente de encruamento ( $K$ ). É determinado experimentalmente, também as propriedades elásticas do material e a microdureza.

Tabela 1 | Propriedades mecânicas de uma liga de Ti-6Al-4V, produzida via SLM, maquinados e sem tratamento térmico.

| Nome dos autores e referência | Provete | Tensão de Cedência (MPa) | Tensão de Rotura (MPa) | Módulo de Young (GPa) | Alongamento (%) | Dureza (HV) |
|-------------------------------|---------|--------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------|-------------|
| Ghosh et al. [5]              | ----    | 1020                     | 1044                   | -----                 | 4,5             | -----       |
| Gong et al. [8]               | OP 1    | 1098                     | 1237                   | 109                   | 8,8             | 387         |
| Cao et al.[9]                 | P       | 1070                     | 1250                   | -----                 | 4,0             | 375         |
| Sun et al.[10]                | V3      | -----                    | 1199                   | -----                 | 9,5             | 330         |
| Liu et al. [11]               | ----    | 940                      | 1060                   | -----                 | 19,6            | -----       |
| Liu et al. [12]               | P2      | -----                    | 1130                   | -----                 | 10,5            | -----       |
| Sun et al. [6]                | 45°     | 1049                     | 1134                   | 111,55                | 3,7             | -----       |
|                               | 0°      | 900                      | 1080                   | 113,26                | 9,2             | -----       |
| Karimi et al. [13]            | SM      | 1162                     | 1404                   | -----                 | 22              | 406         |
| Xu et al. [14]                | 0°      | 906                      | 1043,4                 | 109,1                 | 15,4            | 375         |
| Leuders et al. [15]           | ----    | 1008                     | 1080                   | -----                 | 1,6             | -----       |

Contudo, no que trata a caracterização do comportamento plástico da liga Ti-6Al-4V manufaturada por SLM os autores não encontraram informação. Por conseguinte, este trabalho tem como principal objetivo a determinação experimental do comportamento plástico da liga de Ti-6Al-4V, produzida por SLM sem tratamento térmico, através da determinação do expoente de encruamento (n) e do coeficiente de encruamento (K). É determinado experimentalmente, também as propriedades elásticas do material e a microdureza.

## 2- MATERIAL E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O material utilizado na atividade experimental foi pó metálico de Ti-6Al-4V, com forma esférica, de diâmetro compreendido entre 20-53  $\mu\text{m}$ , e com a composição química representada na tabela 2.

O processo de manufatura aditiva usado foi o SLM, com recurso à E-PLUS EP-M150, SHINING 3D utilizando os parâmetros indicados nas tabelas 3 e 4, e as condições de fabrico listadas na tabela 5.

Tabela 2 | Composição química do pó de Ti-6Al-4V, categoria 23

| Liga:     | Categoria: | Composição química (pond.%) |      |      |      |      |      |       |       |
|-----------|------------|-----------------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Ti-6Al-4V | 23         | Al                          | V    | Fe   | O    | C    | N    | H     | Y     |
|           |            | 6,22                        | 4,01 | 0,25 | 0,10 | 0,08 | 0,03 | 0,012 | 0,005 |

Tabela 3 | Parâmetros de fabrico (*hatch vector*)

| Parâmetros              | <i>Up-skin</i> | <i>In-skin</i> | <i>Down-skin</i> |
|-------------------------|----------------|----------------|------------------|
| Potência Laser          | 180            | 180            | 150              |
| Velocidade de scan      | 1000           | 1000           | 1500             |
| Distância entre cordões | 0,08           | 0,12           | 0,06             |
| Espessura de camada     | 0,03           | 0,03           | 0,03             |
| Densidade de Potência   | 75,00          | 50,00          | 55,56            |

Tabela 4 | Parâmetros de fabrico (*boarder*)

| Parâmetros                | <i>Up-skin</i> | <i>In-skin</i> | <i>Down-skin</i> |
|---------------------------|----------------|----------------|------------------|
| Número de <i>boarders</i> | 0              | 1              | 1                |
| Potência Laser            |                | 160            | 180              |
| Velocidade de scan        |                | 900            | 700              |
| Distância entre cordões   |                | 0,08           | 0,08             |
| Espessura de camada       |                | 0,03           | 0,03             |
| Densidade de Potência     |                | 74,07          | 107,14           |

Tabela 5 | Parâmetros de fabrico (*boarder*)

| Parâmetros                             | Resultados |
|--|------------|
| Fator de fornecimento excessivo (%)    | 115-76     |
| Gás inerte                             | Árgon      |
| Nível de Oxigénio (%)                  | 0,000      |
| Temperatura no interior da câmara (°C) | 2,87       |
| Temperatura na plataforma (°C)         | 71,2       |
| Humidade (%)                           | 48,5       |

A geometria dos provetes fabricados, está em conformidade com a norma da ASTM-E8-22 [16]. A Fig.4 apresenta o desenho do provete.

O corte dos provetes para preparação metalográfica e ensaios de microdureza, seguiu o esquema representado na Fig.5. E teve como recurso a utilização de uma máquina de eletroerosão por fio, modelo Fanuc Robocut alfa-1, segundo uma intensidade de corrente de 4A, uma tensão de 40V e uma velocidade de corte de 0,12mm/s.

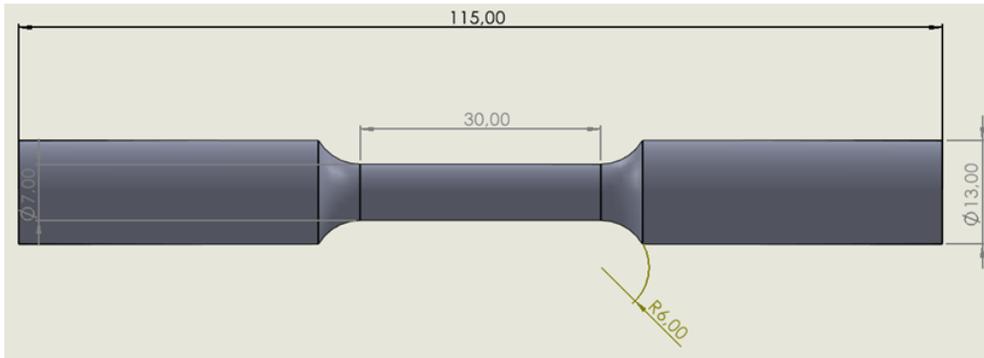


Fig. 4 | Geometria dos provetes ensaiados segundo a norma da ASTM E8-22.

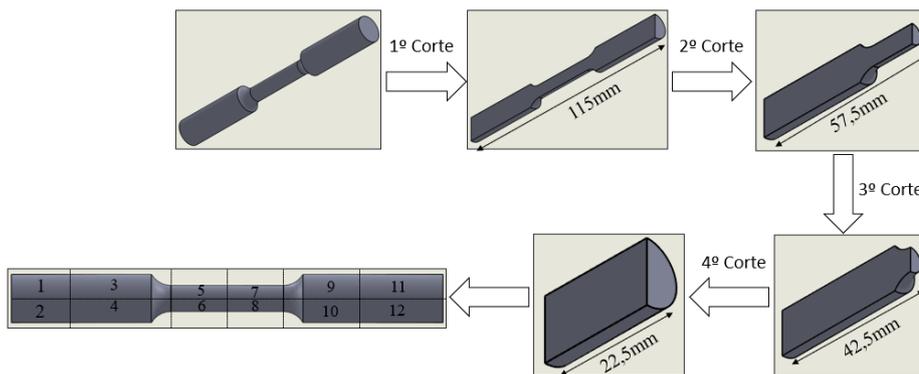


Fig. 5 | Procedimento de corte para a determinação da microdureza.

## 2.1. Preparação e acondicionamento dos pós

É inexistente a informação e normalização sobre a qualidade das peças e a influência de todos os fatores no processo de manufatura aditiva. Para o sucesso no fabrico dos provetes, os autores otimizaram a preparação e acondicionamento dos pós, esquematizado na Fig. 6. O processo inicia-se pela colocação dos pós num forno a vácuo, a uma temperatura de 80°C, durante um período de 10h, para remoção da humidade e pré-aquecimento dos pós. Posteriormente o pó, é colocado diretamente no equipamento de fabrico (ver Fig.7 (a).), que o irá manter a 71,2 °C. Após o fabrico estar concluído parte do material foi utilizado na impressão da geometria, o restante ou vai ser reutilizados (ver Fig.7 (b)) e posteriormente, peneirado (ver Fig. 8) ou é desperdício. A peneiração (ver Fig. 6 e Fig. 8) vai ter como objetivo garantir a integridade dos pós, separando os que já fundiram e são automaticamente considerados resíduos, dos pós que ainda se encontram em boas condições. Seguidamente, os pós reciclados são armazenados em vácuo e aquando a iniciação de um novo fabrico, é repostos em pó novo a quantidade necessária à manufatura.

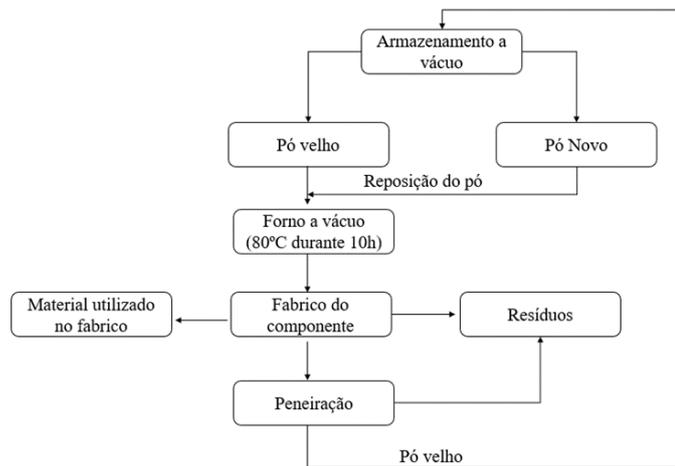


Fig. 6 | Ciclo de preparação dos pós

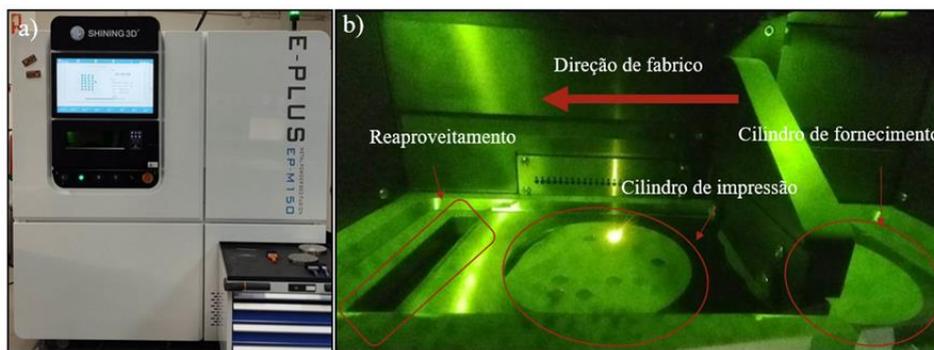


Fig. 7 | a) Equipamento SLM, E-PLUS EP-M150; b) Câmara de impressão (interior do equipamento).



Fig. 8 | Peneirador, SHINING 3D.

## 2.2. Microdureza de Vickers

A preparação das amostras para determinação de microdureza Vicker seguiu a norma da ASTM E3-11 [17]. Tendo sido utilizada uma mistura de resina de epoxy, que foi sujeita a uma sequência de polimento com as seguintes granulometrias: P80, P240, P320, P400, P600, P1200 e P2500. Para concluir o polimento, foi utilizado um pano de polir, embutido com uma pasta de diamante de 3µm.

Os ensaios de microdureza Vickers foram efetuados de acordo com a norma ASTM E384-22 [18]. Usou-se uma força de 0,5 kgf, com uma duração de 10 segundos, e uma distância entre a

indentações fixada em 0,5 mm, garantindo uma separação mínima de 2,5 vezes o comprimento da diagonal de Vickers. Utilizou-se o software Minitab, que usa como recurso o teste de Anderson-Darling, para determinar o valor p que deverá ser igual ou superior ao limiar de confiança de  $\alpha=0,05$ , validando os dados. Efetuaram-se 5 indentações por amostra.

### 2.3. Ensaios de tração

Os ensaios de tração foram realizados à temperatura ambiente, tal como estabelecido pela norma ASTM E8/E8M-22 [16]. Foi utilizado para o equipamento de ensaio de tração uniaxial, modelo Instron 4505 (ver Fig. 9 (a)), com uma célula de carga de 100kN, e um extensômetro acoplado à secção de medição do provete. A relação de deformação utilizada tinha uma velocidade constante de 0,017 mm/s, e os dados foram recolhidos pelo controlador Instron 4000 (ver Fig.9 (b)).



Fig. 9 | a) Equipamento de ensaios de tração uniaxial, Instron 4505. b) Controlador Instron 4000.

## 3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Após o tratamento dos dados do ensaio de tração, foram obtidas as curvas tensão-extensão nominais e verdadeiras (ver Fig. 10 (a)) e conseqüentemente a curva referente à plasticidade da liga de Ti-6Al-4V (ver Fig. 10 (b)).

A partir da análise dos gráficos apresentados na Fig.10, foi possível determinar algumas das propriedades mecânicas que caracterizam o comportamento da liga de Ti-6Al-4V (ver tabela 6). Por outro lado, foram também determinados o valor de resiliência,  $U_r=5,562\text{kJ/m}^2$  e tenacidade,  $U_t=172,002\text{kJ/m}^2$ , e as suas propriedades plásticas, expoente de encruamento  $n=0,0367$  e o coeficiente de resistência  $K=1307,800\text{MPa}$ .

Os resultados experimentais obtidos demonstram uma concordância entre as propriedades mecânicas relatadas na literatura (tabela 1).

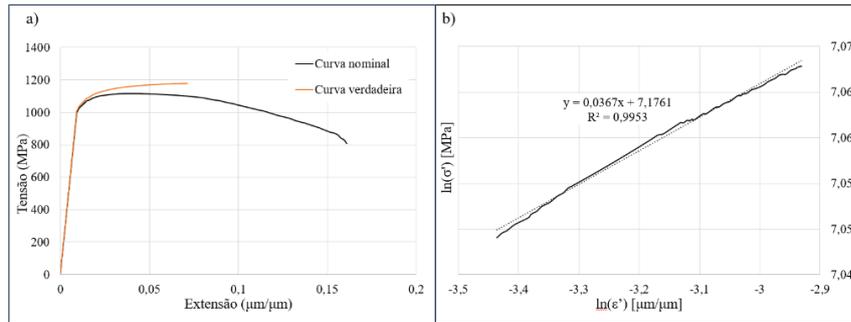


Fig. 10 | a) Curvas de tensão-extensão nominal e verdadeira. b) Retas de deformação plástica uniforme.

Tabela 6 | Propriedades mecânicas de uma liga de Ti-6Al-4V produzida por SLM.

| Curva      | Módulo de Young (GPa) | Tensão de Cedência (MPa) | Tensão de Ruptura (MPa) | Tensão de fratura (MPa) | Extensão de cedência (mm/mm) | Alongamento (%) |
|------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------|
| Nominal    | 108,2                 | 1030                     | 1117                    | 808                     | 0,0108                       | 0,1609          |
| Verdadeira | 109,9                 | 1056                     | 1180                    | -----                   | 0,0121                       | -----           |

De acordo com Froes F.[4] os materiais geralmente são considerados dúcteis quando a sua capacidade de alongamento excede os 8%, o que foi verificado, pois obteve-se um valor experimental de 16,1% (ver tabela 6). Outro fator relevante, que comprova a ductilidade desta liga relaciona-se com o baixo valor do expoente de encruamento,  $n=0,0367$ , que por se tratar de um valor muito próximo do 0 é indicativo de elevada deformação plástica [19] Gupta et al.[20], no estudo da liga de Ti-6Al-4V laminada apresentou resultados do expoente de encruamento semelhantes.

A microdureza obtida na secção transversal foi de  $339,9^{+2,419}_{-2,120}$  HV 0,5, valor inferior ao que é frequentemente descrito na literatura (tabela 1), enquanto na secção longitudinal foi obtido o valor de  $320,7^{+4,176}_{-3,660}$  HV 0,5. Estes valores indicam menores taxas de arrefecimento, o que poderá representar uma microestrutura menos frágil e como consequência a possível causa para o extenso alongamento.

## 4- CONCLUSÕES

A partir da manufatura dos provetes, conclui-se que a tecnologia SLM, é um processo complexo, bastante suscetível à influência de várias variáveis que determinam o êxito na produção e na qualidade do componente. Conclui-se durante o processo experimental que o ciclo de preparação dos pós desempenha um papel crucial na qualidade do componente final e na melhoria das propriedades mecânicas.

Dos resultados referentes à micro dureza conclui-se que os valores obtidos na secção transversal é 5,65% superior ao da secção longitudinal.

Conclui-se também, dos ensaios estáticos, que a liga de Ti-6Al-4V, apresenta boa ductilidade, associada a um forte comportamento plástico. Do comportamento plástico da liga TC4, foi concluído experimentalmente que o expoente de encruamento, foi de  $n= 0,0367$ , o coeficiente de resistência,  $K=1307,80$  MPa, a resiliência,  $Ur=5,462$  (kJ/m<sup>2</sup>) e a tenacidade,  $Ut=172,002$  (kJ/m<sup>2</sup>).

## REFERÊNCIAS

- [1] G. Yang, Y. Xie, S. Zhao, L. Qin, X. Wang, and B. Wu, “Quality control: Internal defects formation mechanism of selective laser melting based on laser–powder–melt pool interaction: A review,” *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*, vol. 1, no. 3, p. 100037, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.cjmeam.2022.100037.
- [2] T. A. Mukalay, J. A. Trimble, K. Mporfu, and R. Muvunzi, “A systematic review of process uncertainty in Ti6Al4V–selective laser melting,” *CIRP J Manuf Sci Technol*, vol. 36, pp. 185–212, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.cirpj.2021.12.005.
- [3] J. Alves, “Modelos de previsão à Fadiga, de uma liga de Ti–6Al–4V produzida por Manufatura Aditiva”, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2023.
- [4] F. H. Froes, “Titanium: physical metallurgy, processing, and applications”. ASM International, 2015.
- [5] A. Ghosh, V. K. Sahu, and N. P. Gurao, “Effect of heat treatment on the ratcheting behaviour of additively manufactured and thermo-mechanically treated Ti–6Al–4V alloy,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 833, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.msea.2021.142345.
- [6] W. Sun, Y. Ma, W. Huang, W. Zhang, and X. Qian, “Effects of build direction on tensile and fatigue performance of selective laser melting Ti6Al4V titanium alloy,” *Int J Fatigue*, vol. 130, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2019.105260.
- [7] S. Ren, Y. Chen, T. Liu, and X. Qu, “Effect of Build Orientation on Mechanical Properties and Microstructure of Ti–6Al–4V Manufactured by Selective Laser Melting,” *Metal Mater Trans A Phys Metall Mater Sci*, vol. 50, no. 9, pp. 4388–4409, Sep. 2019, doi: 10.1007/s11661-019-05322-w.
- [8] H. Gong, K. Rafi, H. Gu, G. D. Janaki Ram, T. Starr, and B. Stucker, “Influence of defects on mechanical properties of Ti–6Al–4V components produced by selective laser melting and electron beam melting,” *Mater Des*, vol. 86, pp. 545–554, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.07.147.
- [9] S. Cao *et al.*, “Defect, Microstructure, and Mechanical Property of Ti–6Al–4V Alloy Fabricated by High–Power Selective Laser Melting,” *JOM*, vol. 69, no. 12. Minerals, Metals and Materials Society, pp. 2684–2692, Dec. 01, 2017. doi: 10.1007/s11837-017-2581-6.
- [10] Q. D. Sun, J. Sun, K. Guo, S. Waqar, J. W. Liu, and L. S. Wang, “Influences of processing parameters and heat treatment on microstructure and mechanical behavior of Ti–6Al–4V fabricated using selective laser melting,” *Adv Manuf*, vol. 10, no. 4, pp. 520–540, Dec. 2022, doi: 10.1007/s40436-022-00389-y.
- [11] F. Liu, C. He, Y. Chen, H. Zhang, Q. Wang, and Y. Liu, “Effects of defects on tensile and fatigue behaviors of selective laser melted titanium alloy in very high cycle regime,” *Int J Fatigue*, vol. 140, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105795.
- [12] J. Liu *et al.*, “Achieving Ti6Al4V alloys with both high strength and ductility via selective laser melting,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 766, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.msea.2019.138319.

- [13] J. Karimi, L. Kollo, and K. G. Prashanth, "Tailoring Anisotropy and Heterogeneity of Selective Laser Melted Ti6Al4V Alloys," *Transactions of the Indian National Academy of Engineering*, Feb. 2023, doi: 10.1007/s41403-023-00393-z.
- [14] Z. Xu, A. Liu, X. Wang, B. Liu, and M. Guo, "Fatigue limit prediction model and fatigue crack growth mechanism for selective laser melting Ti6Al4V samples with inherent defects," *Int J Fatigue*, vol. 143, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2020.106008.
- [15] S. Leuders *et al.*, "On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance," *Int J Fatigue*, vol. 48, pp. 300–307, 2012, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2012.11.011.
- [16] ASTM E8/E8M-22, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials," 2022.
- [17] ASTM E3-11, "Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens," 2017
- [18] ASTM E384-22, "Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials," 2022 doi: 10.1520/E0384-17.
- [19] C. Moura Branco, "Mecânica dos Materiais", 5<sup>a</sup>.edição, Fundação Calouste Gulbenkian, 2011.
- [20] R. K. Gupta, V. A. Kumar, C. Mathew, and G. S. Rao, "Strain hardening of Titanium alloy Ti6Al4V sheets with prior heat treatment and cold working," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 662, pp. 537–550, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.msea.2016.03.094.