

ENSAIOS DE RISCAMENTO EM MICROESCALA APLICADOS À LIGA Ti6Al4V PROCESSADA POR MANUFATURA ADITIVA EB-PBF

Felipe Mariusso Madaleno ¹; Vanessa Seriacopi ²

¹ Aluno de Iniciação Científica do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT);

² Professora do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT).

Resumo. Este estudo consistiu em conduzir caracterizações microestrutural e mecânica de corpos de prova da liga Ti6Al4V, processada por manufatura aditiva por fusão em leito de pó com feixe de elétrons (EB-PBF), empregando preparação metalográfica e análise das seções transversais e longitudinais destas amostras por microscopia óptica (MO) e eletrônica de varredura (MEV), difração de raio X (DRX), e ensaios de microdureza Vickers. Adicionalmente, foram conduzidos ensaios de riscamento com forças normais de 10 e 50 mN, utilizando uma partícula abrasiva de diamante cono-esférica de 10 µm de diâmetro, para investigar mecanismos de abrasão em microescala e compreender o efeito da microestrutura sobre seu desempenho tribológico. A liga processada por EB-PBF apresentou microestrutura com grãos colunares e estruturas de Widmanstätten, predominância da fase α e valores de dureza próximos aos da literatura, com pequenas diferenças entre seções. A densidade e a rugosidade confirmaram a presença de porosidade. Nos ensaios de riscamento, observou-se predominância do micro-sulcamento em 10 mN e do micro-corte em 50 mN, com variações locais no coeficiente de atrito e influência direta da carga aplicada na profundidade dos riscos. Esses resultados evidenciam a relação entre a microestrutura e o comportamento tribológico da liga em microescala.

Introdução

As ligas de titânio (Ti) apresentam empregos em diversas áreas como aeroespacial, automotiva, naval, química e bioengenharia, possibilitando a concepção e obtenção de peças distintas, dispositivos, vasos de pressão, turbinas a gás, próteses e outros, graças à sua relação de resistência mecânica/massa, resistência às temperaturas elevadas, à fadiga, à corrosão e sua biocompatibilidade (Li *et al.*, 2024). Especificamente a liga Ti6Al4V ou Ti64, se trata se um biomaterial que em condições de equilíbrio e de acordo com as faixas de temperatura, pode prover fases hexagonal compacta (fase α), e cúbica de corpo centrado (fase β), sendo que o alumínio tende a estabilizar a fase α de modo a aumentar sua ductilidade, e o vanádio tende a estabilizar a fase β de modo a aumentar a resistência mecânica da liga (Zheng *et al.*, 2018).

Em função da complexidade de geometrias, da síntese de materiais e do design dos componentes de ligas à base de Ti, a manufatura aditiva (MA) tem se mostrado uma tecnologia promissora ao reduzir perdas de material em comparação à manufatura subtrativa convencional, fornecendo formas próximas ao final do projeto proposto. Para a MA de metais, o principal método empregado é a fusão em leito de pó (*powder bed fusion* – PBF) por laser (L-PBF) ou por feixe de elétrons (EB-PBF). Contudo, esses processos de MA podem acarretar defeitos relacionados à precisão dimensional e tolerância geométrica, tensões residuais, anisotropia, porosidade e heterogeneidades, abrindo caminhos para estudos direcionados a pós-tratamentos térmicos e usinagem (Bordinassi *et al.*, 2022).

Uma das vertentes na literatura para melhorar o entendimento da liga Ti6Al4V processada por manufatura aditiva é por meio de ensaios tribológicos, que permite analisar o desempenho da liga ao atrito e desgaste. O comportamento dos materiais quanto à deformação, falha, encruamento e transformação de fase pode estar relacionado às características microestruturais durante os processos de remoção de massa. Jeyaprakash *et al.*, (2024) caracterizaram na liga a formação de redes de martensita com orientação específica e grãos colunares, precipitados ricos em V e fases α e β após a manufatura aditiva por fusão em leito

de pó via feixe de elétrons, o que modifica localmente os valores de módulo de elasticidade e dureza obtidos por nanoindentação.

Sob essa perspectiva, neste estudo, foi realizada uma avaliação da liga Ti6Al4V por meio de sua microestrutura, com o objetivo geral de investigar sua influência nos mecanismos de abrasão. Para isso, foi analisada a abrasão unitária por meio de uma partícula aplicada em ensaios de riscamento, com foco na caracterização dos micromecanismos abrasivos, sendo o micro-sulcamento, com deformação plástica, e o micro-corte, em que a remoção efetiva do material ocorre, a fim de atingir também objetivos específicos de caracterização microestrutural, avaliação topográfica inicial e as influências de fases, anisotropia e porosidades no coeficiente de atrito e mecanismos de deformação.

Materiais e Métodos

Corpos de prova cilíndricos (\varnothing 10 mm e 20 mm de espessura) da liga Ti6Al4V, obtidos por MA com aplicação de feixe de elétrons, foram fabricados no sentido longitudinal em colaboração com o Instituto Mauá de Tecnologia (IMT), o Instituto Federal de São Paulo (IFSP) e a empresa de implantes ortopédicos Ortosintese®. Os parâmetros de fabricação foram definidos em condições otimizadas na máquina Arcam modelo Q10 plus, com potência do feixe de elétrons de 3 kW, diâmetro de feixe de 140 μm , câmara a vácuo de $5 \cdot 10^{-4}$ mbar e parcialmente pressurizada com hélio $4 \cdot 10^{-3}$ mbar (Silva, 2022).

- Para atingir os objetivos propostos, a metodologia consistiu nas seguintes etapas:
- (1) A preparação metalográfica das seções longitudinal (SL) e transversal (ST) foi realizada com base em procedimentos para ligas de Ti bifásicas (ligas de fase $\alpha+\beta$) descritos por Milošev *et al.* (2024) e na norma ASTM E3-11 (ASTM International, 2017b), sendo primeiro o lixamento progressivo da liga, utilizando as lixas #220, 330, 600, 1200, e 2000. Para o polimento, foram utilizadas pastas de diamante de 6 μm e 1 μm . Em seguida, as amostras foram submetidas ao ataque por imersão em Kroll (Alaghmandfar *et al.*, 2024) para revelar sua microestrutura. A caracterização foi obtida utilizando o microscópio óptico (MO) Olympus BX60M e o microscópio eletrônico de varredura (MEV) Tescan Vega 4, equipado com espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS), para verificar a composição química. Outrossim, a caracterização das fases foi feita via difração de raios X (DRX);
 - (2) A caracterização da porosidade e da topografia inicial dos corpos de prova foi conduzida por meio de: (a) medição da densidade pelo princípio de Arquimedes utilizando água e álcool como meios de imersão, segundo a norma ASTM B962-23 (ASTM International, 2023); (b) medição da rugosidade superficial de cada seção utilizando o rugosímetro modelo Mitutoyo SJ-310 SERIES, obtendo três valores de Ra, Rq, Rz e Rt para cada seção, segundo a norma ISO 21920-2:2021 (ISO/ASTM, 2021). Os valores de Ra (rugosidade média) foram obtidos por ser o parâmetro mais comum de análise, a fim de comparar com o acabamento superficial de outros processos e controlar a superfície para realizar o ensaio de riscamento, os valores Rq (rugosidade quadrática) são mais sensíveis a picos e vales extremos em comparação com o Ra, já para analisar a porosidade das seções, os parâmetros Rz (rugosidade média entre 5 valores de maiores picos e vales) e Rt (distância entre o pico mais alto e o vale mais baixo) são mais indicados, pois com eles é possível identificar possíveis profundidades causadas por porosidades do processo de fabricação;
 - (3) Medição da microdureza Vickers, segundo a norma ASTM E92-17 (ASTM International, 2017a), fazendo uso do durômetro Vickers modelo Mitutoyo HM-100, com aplicação de carga de 200 gf. Para a análise dos resultados, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) para verificar se há diferença estatisticamente significativa entre as seções SL e ST.
 - (4) Ensaios de riscamento em microescala foram efetuados, aplicando força normal constante com cargas que representassem os mecanismos de abrasão dominantes: micro-sulcamento com apenas deformação plástica, e micro-corte com a remoção efetiva do material. Foram conduzidos 2 ensaios com cargas constantes de 10 e 50 mN, comprimento de 250 μm e

velocidade de 10 $\mu\text{m}/\text{s}$ em ambas as seções SL e ST, totalizando 4 ensaios que auxiliaram na análise de efeitos microestruturais de fases, contornos de grãos, porosidade e outros. Os riscos foram realizados por meio do módulo *High-Load* do equipamento TI-950 Tribotribómetro Hysitron – Bruker Co., com a ponta cono-esférica de diamante com diâmetro de 10 μm , a fim de obter valores de profundidade de penetração (μm), no Laboratório de Fenômenos de Superfície, da Escola Politécnica da USP; sendo que o coeficiente de atrito aparente foi obtido nos referidos ensaios laboratoriais;

(5) A caracterização da topografia dos ensaios tribológicos foi realizada por meio de microscopia digital 3D, utilizando o equipamento Olympus DSX1000, para obter valores de largura e profundidade do risco após o retorno elástico do material.

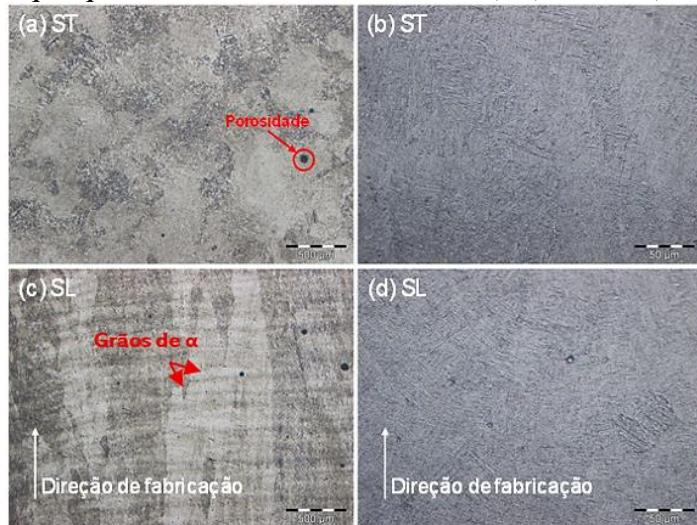
Resultados e Discussão

1. Caracterização microestrutural inicial

A Figura 1 apresenta microscopia óptica das seções longitudinal e transversal da liga Ti6Al4V, com aumentos de 50x e 500x. Pode-se observar pela Figura 1c a presença dos grãos colunares na microestrutura, que são formados graças a um gradiente de temperatura paralelo à direção de fabricação da amostra.

As razões para esse fenômeno podem estar relacionadas com a transferência de calor da amostra durante sua fabricação, o pó do material que está ao redor age como uma camada isolante que impede a transferência no sentido perpendicular à construção; além disso, a alta temperatura da base faz com que a única região que possa dissipar seja a superfície do topo, garantindo esse gradiente paralelo (Alaghmandfar et al., 2024). Pelas Figuras 1b e 1d, já é possível observar a predominância de plaquetas de fase α , indicando a presença de estruturas de Widmanstätten, que são repetições de lamelas α (Universidad Complutense Madrid, 2025).

Figura 1 - Micrografias, obtidas por microscopia óptica, das seções da liga Ti6Al4V após ataque químico, com aumentos de 50x (a c) e 500x (b, d).



Fonte: Próprio autor (2025)

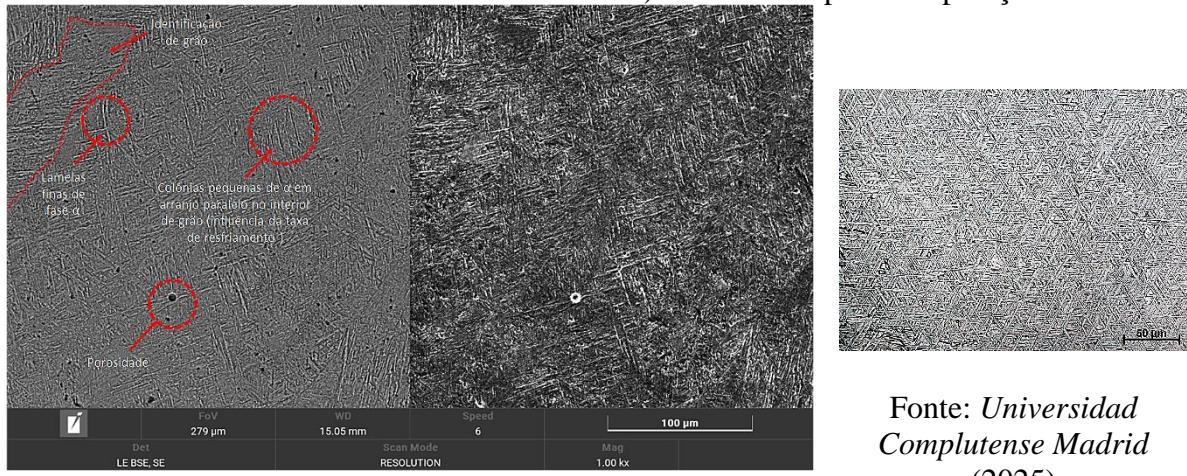
Utilizando-se do MEV, é possível compreender melhor essas estruturas lamelares repetidas, e a maior parte da microestrutura é composta apenas por fase clara α , enquanto há grãos de β , de uma pequena área mais escura. Na liga estudada, praticamente não há formação de fase β ; apenas plaquetas α , indicadas na Figura 2, formadas por transformação contínua devido à taxa de resfriamento. Nessa condição, as estruturas Widmanstätten podem formar-se, nas quais essas plaquetas crescem em diferentes sentidos até atingir outras plaquetas ou colônias

de fase α . Na microscopia obtida, os grãos são majoritariamente compostos por α , com mudança de coloração indicativa de possível diferença na orientação cristalográfica.

Em paralelo, os resultados obtidos pelo DRX, apresentados na Figura 3, também indicam a presença majoritária da fase α , mesmo em planos com orientações distintas. A evidência da presença de fase β é apenas um pequeno pico em $2\theta = 39,7^\circ$, pertencente ao pico da fase alfa (101) (Panin *et al.*, 2019).

A Espectrometria de Dispersão de Energia de Raios X (EDS) é uma técnica utilizada para analisar a composição elementar de materiais em um MEV. Quando a amostra é exposta a um feixe de elétrons no vácuo, são gerados elétrons, raios X e luz, cujos sinais podem ser usados para estudar a microestrutura, a composição e a estrutura cristalina do material (Bernier-Tremblay, 2024). Com isso, foram realizados mapas EDS para identificar possíveis contaminações superficiais e a composição real da amostra. Os valores obtidos para porcentagem em massa (% wt.) média para titânio, alumínio e vanádio foram 89,28%, 6,79% e 3,93% respectivamente. A Figura 4 apresenta o mapa obtido na seção longitudinal da amostra, sendo que a composição química está de acordo com os valores também obtidos por Zeng *et al.* (2018).

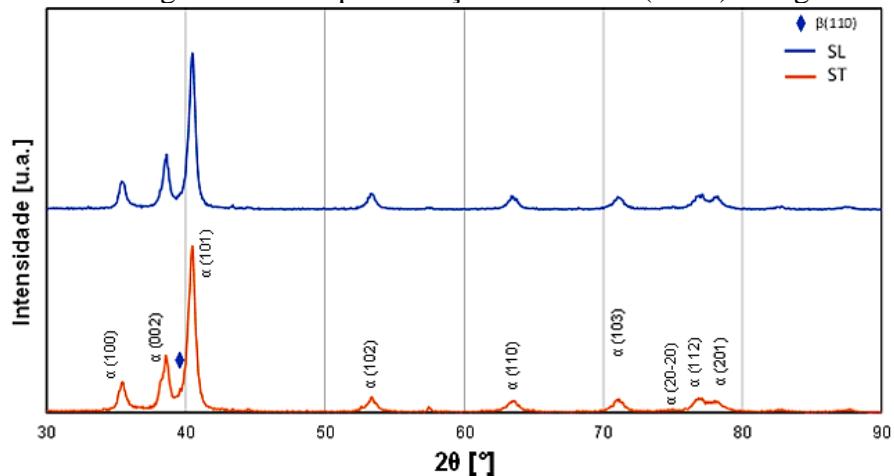
Figura 2 - Microscopia eletrônica de varredura da liga Ti6Al4V, com aumento de 1000x: imagens de BSE – elétrons retroespalhados; e de SE – elétrons secundários, respectivamente. À direita, micrografia óptica da estrutura Widmanstätten fina (padrão entrelaçado conhecido como “tecido de cesta” - basket weave) de literatura para comparação



Fonte: Próprio autor (2025)

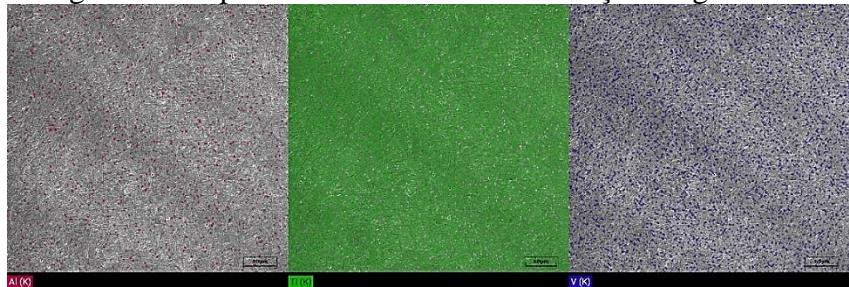
Fonte: Universidad Complutense Madrid (2025)

Figura 3 - Difratograma obtido por difração de raios X (DRX) da liga Ti6Al4V.



Fonte: Próprio autor (2025)

Figura 4 - Mapa de EDS/MEV obtido da seção longitudinal.



Fonte: Próprio autor (2025)

2. Caracterização da superfície inicial da liga Ti6Al4V por EB-PBF

2.1. Densidade

Para a medição da densidade, utilizando-se tanto água quanto álcool como meios de imersão para cada seção, o valor médio foi comparado com os valores obtidos por (Mofazali *et al.*, 2025).

Tanto os valores obtidos quanto os de referência estão apresentados na Tabela 1. É possível observar que os valores obtidos neste trabalho (ST e SL) foram satisfatórios. Ambos são menores que a referência de fundição, embora próximos, o que se explica pela alta porosidade dos materiais fabricados por manufatura aditiva. Essa porosidade é causada por fatores como: propriedades do pó utilizado (tamanho e composição); aprisionamento de gases que acabam formando poros circulares durante o resfriamento; fusão incompleta na deposição de camadas que acabam formando poros alongados; e uma baixa densidade de energia proveniente do processo de EB-PBF quando comparado aos processos que utilizam laser como meio de sinterização do pó (Mofazali *et al.*, 2025).

Tabela 1 - Valores obtidos de densidade para a liga Ti6Al4V.

	Água destilada [kg/m ³]	Álcool [kg/m ³]	Média [kg/m ³]	Desvio padrão [kg/m ³]	Densidade [kg/m ³]
ST	4368,6	4370	4369	1	(4369 ± 1)
SL	4395,5	4394	4395	1	(4395 ± 1)
Fundição (Literatura)	---	---	---	---	4440
EB-PBF (Literatura)	---	---	---	---	4170

Fonte: Próprio autor (2025)

2.2. Rugosidade

Para a medição da rugosidade, foram realizadas três medições dos parâmetros Ra, Rq, Rz e Rt em cada seção da amostra previamente ao ensaio de riscamento, a fim de identificar quaisquer irregularidades acentuadas que pudessem prejudicar o ensaio tribológico. A Tabela 2 fornece os valores obtidos para cada seção e, com isso, é possível analisar que a rugosidade média é influenciada pelo ataque químico, que, após o polimento, modifica a superfície; porém, os valores obtidos estão adequados para a realização do ensaio, tendo em vista o parâmetro Ra que se manteve próximo ou abaixo de 1,000. Em adição, é possível notar valores distintos de rugosidade, o que pode indicar a influência de porosidades localizadas na medição.

Tabela 2 - Valores de rugosidade obtidos para cada seção da liga de Ti6Al4V após a preparação metalográfica e o ataque químico.

	ST				SL			
	Ra	Rq	Rz	Rt	Ra	Rq	Rz	Rt
	0,678	0,816	4,119	4,922	1,013	1,182	5,49	6,426
	0,888	1,129	7,117	12,217	1,059	1,253	5,848	6,343
	0,841	1,021	5,291	7,118	0,946	1,107	5,144	5,663
Média	0,802	0,989	5,509	8,086	1,006	1,181	5,494	6,144
Desvio Padrão	0,11	0,16	1,51	3,74	0,06	0,07	0,35	0,42
Rugosidade (µm)	(0,802 ± 0,11)	(0,989 ± 0,16)	(5,509 ± 1,51)	(8,086 ± 3,74)	(1,006 ± 0,06)	(1,181 ± 0,07)	(5,494 ± 0,35)	(6,144 ± 0,42)

Fonte: Próprio autor (2025)

3. Propriedades mecânicas por microdureza Vickers

Para a análise da microdureza Vickers da amostra, calculou-se o valor médio de cada seção (SL e ST), com 10 medições em cada, bem como o valor de dispersão, medido pelo desvio padrão, conforme indicado na Tabela 3. Já a Tabela 4 apresenta o resultado da Análise de Variância (ANOVA), com nível de significância de 5%. Ao comparar o valor F com o F crítico, há indício de que os valores são diferentes, confirmado pelo fato de que o valor de P é bem menor que 5%, indicando diferença estatística entre os valores.

Tabela 3 - Valores obtidos de microdureza Vickers utilizando carga de 200 gf.

Indentação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Valores
											médios e dispersão
Longitudinal	Resultados [HV_{0,2}]	357	364	370	385	374	381	368	375	373	354
											370,1 ± 9,78
Transversal	Resultados [HV_{0,2}]	360	366	354	345	357	352	362	334	342	343
											351,5 ± 10,22

Fonte: Próprio autor (2025)

Tabela 4 - Teste ANOVA dos resultados de microdureza Vickers.

Fonte de Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Fator F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	1729,8	1	1729,8	1728,45 6	0,00059 2	4413,87 3
Dentro dos grupos	1801,4	18	1000,778			
Total	3531,2	19				

Fonte: Próprio autor (2025)

Apesar da diferença estatística obtida, os valores estão coerentes com a literatura de 376 HV, é possível analisar que há uma pequena diferença nos valores de dureza entre as seções, sendo a longitudinal ligeiramente maior, e essa diferença se dá pela anisotropia gerada pelo próprio processo de manufatura, que acaba favorecendo as propriedades do material em uma direção. Além do mais, analisando as seções transversais em função do comprimento, a dureza da liga de Ti6Al4V fabricada por manufatura aditiva tende a ser menor em regiões

centrais em comparação com as extremidades graças à formação de microestruturas diferenciadas nas pontas devido a uma taxa de resfriamento maior em relação ao meio do material, resultando em uma maior dureza no topo da peça (Khun *et al.*, 2018).

4. Ensaios de riscamento

Com o ensaio, foi possível obter os valores do coeficiente de atrito durante 250 μm das seções, e identificar os casos de micro-sulcamento e micro corte.

A Figura 5 representa o risco realizado com carga de 10 mN na seção longitudinal e permite identificar que, predominantemente, houve apenas deformação plástica, com formação de *pile-up* e pouca remoção de material em forma de cavaco. Nela, também é possível identificar um aumento local no coeficiente de atrito, onde houve deposição de material na borda e onde o indentador atravessou uma área de oxidação. Seu valor médio foi de $0,39 \pm 0,06$.

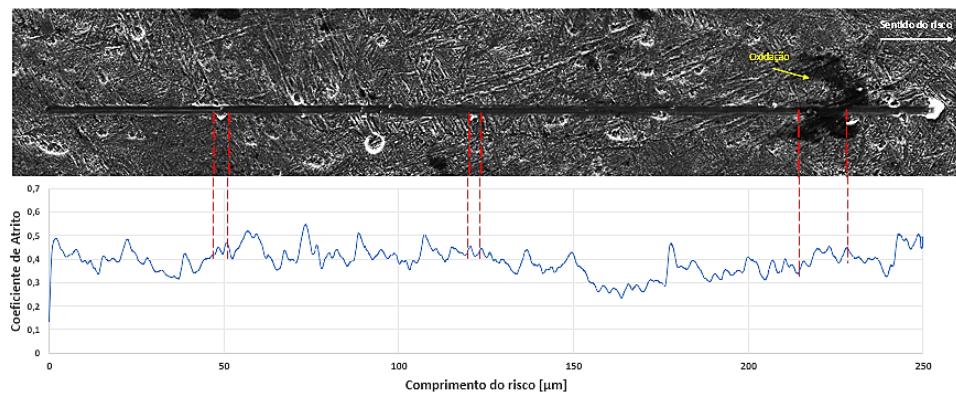
Já na Figura 6, ao utilizar a carga de 50 mN também na SL, é possível identificar a predominância da remoção do material, caracterizando uma situação de micro-corte. É possível identificar um aumento acentuado no coeficiente de atrito, de valor médio $0,43 \pm 0,08$, nas regiões em que o material foi removido, além do mais, nota-se uma homogeneidade maior dos valores, visto que, pelo aumento da carga, o indentador sofre menos as ações das irregularidades superficiais.

Com relação aos riscos realizados na seção transversal, a Figura 7 apresenta o ensaio com carga constante de 10 mN. Nessa seção, observou-se um efeito da oxidação mais evidente no material. Além disso, é possível notar uma região em que o coeficiente de atrito apresentou uma alteração local, indicando que o indentador atravessou uma porosidade. Novamente, a deformação plástica foi predominante sob essa carga. Vale ressaltar também que o valor médio do coeficiente foi menor em comparação com o ensaio de mesma carga para a SL, na qual o indentador precisava atravessar as camadas de material depositado.

Já na Figura 8, é possível identificar novamente essas variações locais no valor do coeficiente de atrito, possivelmente decorrentes da orientação dos grãos. Assim como na SL, o principal mecanismo de abrasão refere-se ao micro-corte, onde notou-se também um ligeiro aumento em seu valor em locais com deposição de material na borda.

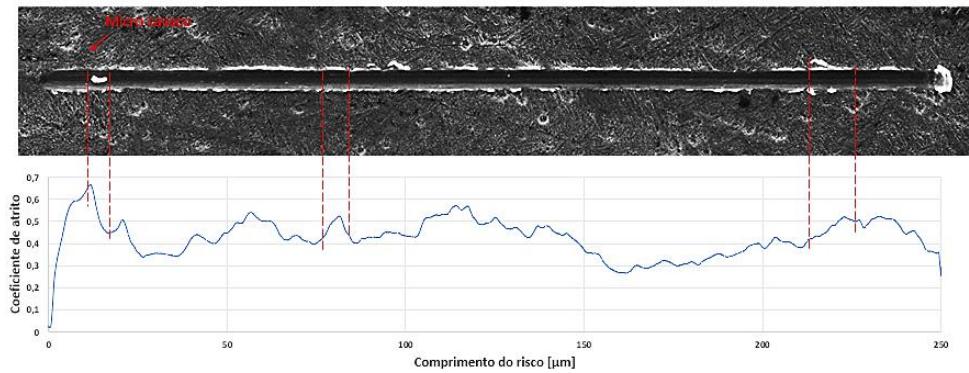
Foi possível identificar oscilações locais no sinal do coeficiente de atrito aparente e às vezes na largura do risco, possivelmente em função da presença de grãos com orientações distintas que promovem mecanismos de deformação plástica diferenciados e formação de cavacos laterais (Seriacopi *et al.*, 2020).

Figura 5 - Correlação entre o risco com carga de 10 mN e coeficiente de atrito para SL.



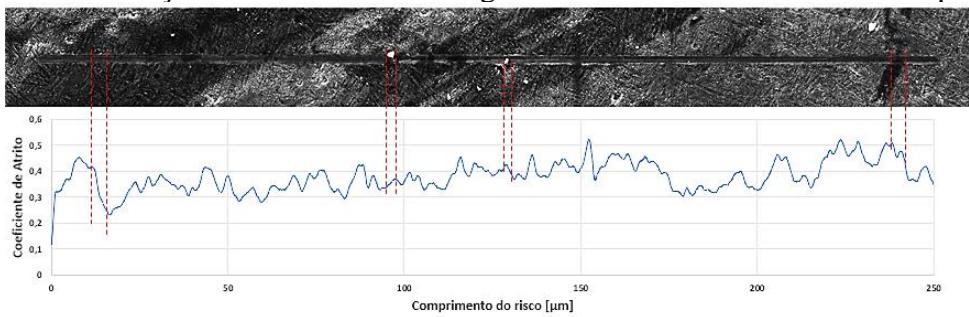
Fonte: Próprio autor (2025)

Figura 6 - Correlação entre o risco com carga de 50 mN e coeficiente de atrito para SL.



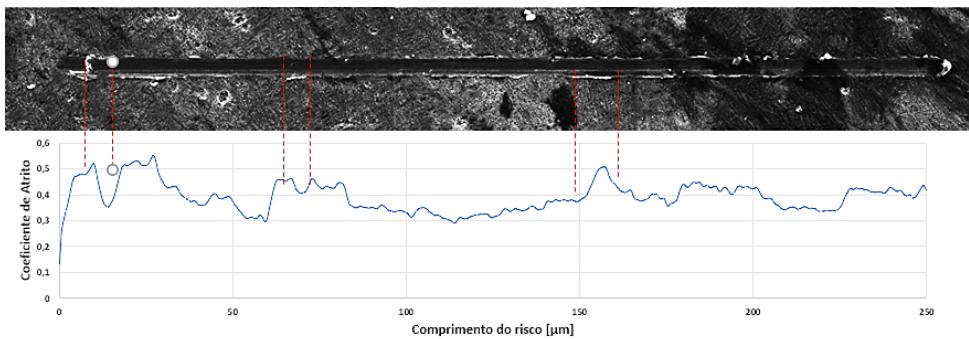
Fonte: Próprio autor (2025)

Figura 7 - Correlação entre o risco com carga de 10 mN e coeficiente de atrito para ST.



Fonte: Próprio autor (2025)

Figura 8 - Correlação entre o risco com carga de 50 mN e coeficiente de atrito para ST.



Fonte: Próprio autor (2025)

5. Caracterização final da topografia dos riscos

Utilizando o DSX1000 para microscopia e o MEV para medição, foi realizada a caracterização geométrica dos riscos, obtendo-se os valores de profundidade e largura apresentados na Tabela 5. Além disso, as Figuras 9 e 10 indicam os riscos no DSX1000, utilizando uma força de 50 mN em cada seção. É possível notar um aumento no valor do coeficiente de atrito (COF) em relação a SL, porém no caso da ST esse valor permaneceu praticamente o mesmo, indicando novamente a anisotropia gerada pelo processo, em que a seção longitudinal foi mais afetada pela diferença de carga, possivelmente explicado pelo indentador precisar atravessar camadas de deposição do material, já que na seção transversal, a partícula afetou apenas a mesma camada.

Tabela 5 - Valores de profundidade e largura dos riscos obtidos

	SL 10 mN	SL 50 mN	ST 10 mN	ST 50 mN
Profundidade [μm]	0,041 + 0,010	0,367 + 0,183	0,051 + 0,051	0,164 + 0,162
Largura [μm]	2,33 + 0,13	4,20 + 1,76	1,94 + 0,29	4,39 + 0,34
COF Médio	0,38 + 0,06	0,42 + 0,08	0,37 + 0,05	0,40 + 0,06

Fonte: Próprio autor (2025)

Figura 9 - Microscopia obtida do risco de 50 mN na SL – DSX1000.



Fonte: Próprio autor (2025)

Figura 10 - Microscopia obtida do risco de 50 mN na ST – DSX1000.



Fonte: Próprio autor (2025)

Conclusões

- A microestrutura da liga de Ti6Al4V apresentou grãos colunares finos e estrutura de Widmanstätten, com predominância da fase α e baixa presença da fase β , visualmente identificada pela microscopia óptica e MEV, e comprovada pelo estudo de DRX.
- A análise da densidade indicou valores próximos a uma liga fundida, mas inferiores devido à porosidade circular decorrente da MA, causada pelo aprisionamento de gases.
- A rugosidade média obtida é maior do que o valor esperado para um polimento, devido ao ataque químico da amostra; porém, a preparação metalográfica é recomendada para o ensaio de riscamento, tendo em vista a obtenção da qualidade superficial necessária para o ensaio e melhor definição das regiões a serem ensaiadas.
- A microdureza Vickers apresentou valores médios coerentes com a literatura, porém com variação entre seções SL e ST, estatisticamente comprovada pela ANOVA, indicando leve anisotropia, com maior dureza nas extremidades superficiais da peça.
- Nos ensaios com carga de 10 mN predominou o micro-sulcamento em ambas as seções, caracterizado por deformação plástica e com reduzida remoção localizada de material, sendo obtidos menores valores geométricos de profundidade e largura do risco.
- Sob a carga de 50 mN, predominou o micro-corte, com maior remoção de material com formação de micro-cavacos, valores elevados de profundidade e largura do risco, e coeficiente de atrito ligeiramente superior apenas na seção longitudinal, causada pela anisotropia resultante do processo.
- Embora o coeficiente de atrito médio seja similar para as duas condições de força normal aplicada no riscamento, a amplitude das variações locais é mais acentuada no caso do micro-corte, o que enfatiza a importância da abordagem em microescala para previsões sobre a abrasão unitária da liga de Ti avaliada.

- Portanto, os objetivos da pesquisa foram atendidos, sendo que os resultados demonstram que a microestrutura do material e sua anisotropia influenciou diretamente os mecanismos de desgaste em microescala, estabelecendo uma relação entre as características obtidas por MA e a resposta tribológica da liga Ti6Al4V.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Mauá de Tecnologia e à FAPESP (números dos processos: 2020/09163-3; 2023/14365-2) pelo apoio financeiro e infraestrutura proporcionada. Além disso, agradecimentos à Profa. Dra. Erika F. Prados (UFABC), à Profa. Dra. Izabel F. Machado (LFS/EPUSP), e ao Prof. Dr. Wilson Carlos da S. Júnior (IFSP) pela colaboração e prover os corpos de prova, e a infraestrutura para os ensaios de riscamento e DRX.

Referências Bibliográficas

- Alaghmandfard, R. *et al.* (2024) Heat treatment, microstructure, texture, and mechanical properties of electron beam melted Ti6Al4V. *Journal of Alloys and Compounds*, **1006**, 176265.
- ASTM International (2017a) *Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials*. West Conshohocken, PA.
- ASTM International (2017b) *Guide for Preparation of Metallographic Specimens*. West Conshohocken, PA.
- ASTM International (2023) *Test Methods for Density of Compacted or Sintered Powder Metallurgy (PM) Products Using Archimedes Principle*. West Conshohocken, PA.
- Bernier-Tremblay, C. (2024) *Influence of Process Parameters on Microstructural Characteristics and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Samples Manufactured through Electron Beam Melting Manufacturing*. Concordia University, Thesis (Masters).
- Bordinassi, E. C. *et al.* (2022) Effect of hybrid manufacturing (am-machining) on the residual stress and pitting corrosion resistance of 316L stainless steel. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, **44**, 491.
- ISO/ASTM (2021) *Additive manufacturing - General principles - Fundamentals and vocabulary* ISO/ASTM 52900:2021.
- Jeyaprakash, N. *et al.* (2024) Effect of martensitic phase formation on the nano-mechanical attributes during the electron beam melting process of Ti-6Al-4V. *Materials Characterization*, **207**, 113592.
- Khun, N. W. *et al.* (2018) Tribological properties of three-dimensionally printed ti-6al-4v material via electron beam melting process tested against 100Cr6 steel without and with Hank's solution. *Journal of Tribology*, **140**, 061606.
- Li, G. *et al.* (2024) Effects of electron beam current on local microstructure characteristics and tensile behaviors of Ti-6Al-4V alloys fabricated by electron beam melting. *Materials Science and Engineering: A*, **912**, 146966.
- Mofazali, P. *et al.* (2025) Comparison and evolution of Ti6Al4V bioalloy fabricated by laser and electron beam additive manufacturing: mechanical features and anisotropic electrochemical properties. *Materials Today Communications*, **47**, 113124.
- Panin, A. *et al.* (2019) Microstructure and mechanical behaviour of additive manufactured Ti-6Al-4V parts under tension. *EPJ Web of Conferences*, **221**, 01037.
- Seriacopi, V; *et al.* (2020) Mechanical behavior and abrasive mechanism mapping applied to micro-scratch tests on homogeneous and heterogeneous materials: FEM and experimental analyses. *Wear*, **450–451**, 203240.
- Silva, G. S. (2022) *Caracterização microestrutural de corpos de provas de liga Ti6Al4V fabricados por manufatura aditiva pelo processo de fusão de feixe de elétrons*. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), Dissertação de Mestrado.
- Universidad Complutense Madrid (2025) *Ti6Al4V-F Fine Widmanstätten*. Disponível em: <https://www.ucm.es/metallographicatlas/ti6al4v-f>.
- Zeng, L. R. *et al.* (2018) Influence of alloy element partitioning on strength of primary α phase in Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Materials Science and Technology*, **34**, 782–787.