

# Análise das propriedades tribológicas de revestimentos de óxido de alumínio produzidos por anodização

Andréia Larissa Alves de Almeida <sup>1</sup>, Carina Barros Mello <sup>2</sup>, Graziela da Silva Savonov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil  
Aluno de Mestrado do curso de Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores - CMS.

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil  
andreaia.almeida@inpe.br

---

**Resumo.** O processo de anodização é um dos tratamentos de superfícies mais práticos e com melhor custo/benefício, sendo um procedimento amplamente usado para aumentar a resistência ao desgaste e a dureza de ligas de alumínio, como a AA6061. Neste estudo, a anodização foi realizada com uma concentração e tempo constantes, com o mesmo eletrólito, variando apenas a densidade de corrente. Para caracterizar o filme obtido, utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura (MEV) e o perfilômetro óptico. A microdureza, e o comportamento tribológico do revestimento foram avaliados. Os resultados revelaram que quanto maior a densidade de corrente, mais espesso, maior carga crítica e maior a rugosidade do revestimento. Já com a densidade de corrente média, obteve-se um filme mais homogêneo, com maior dureza e maior coeficiente de atrito médio.

---

**Palavras-chave:** Materiais óxidos; Ligas de alumínio; Tribologia; Propriedades mecânicas.

## 1. Introdução

A liga de alumínio AA6061 é amplamente utilizada nos setores aeronáutico e aeroespacial principalmente devido à sua baixa densidade, alta condutividade térmica e elétrica e alta relação de resistência/peso, mas a sua baixa resistência ao desgaste limita sua aplicação em alguns componentes que requerem contato por atrito (MOHITFAR et al., 2020). Uma solução é formar uma camada de óxido de alumínio na superfície da liga, além de ser um procedimento simples, possui alta eficácia, em que, uma das suas principais funções é aumentar a resistência ao desgaste por atrito e a corrosão (GUO et al., 2022).

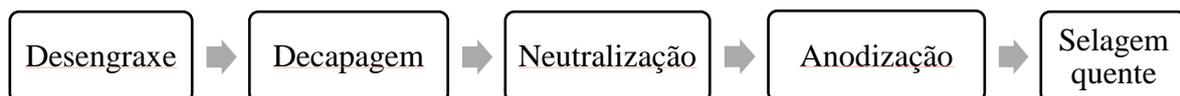
Este óxido pode ser formado a partir do processo de anodização, no qual o alumínio é colocado em um banho eletrolítico e é aplicada uma diferença de potencial. O metal a ser tratado será o ânodo. A anodização é um processo eletroquímico que converte a camada superficial do metal em uma camada protetora de óxido, a espessura do filme pode ser de alguns micrometros a aproximadamente 30 mm, dependendo das aplicações. Durante o processo de anodização, dois tipos de camadas são formados: uma camada interna – chamada de camada barreira, é um filme mais compacto e não poroso – e uma camada externa, porosa, formada por células hexagonais combinadas. A espessura da camada

anodizada e as dimensões dos poros podem ser modificadas pela seleção do eletrólito anodizado e das condições de anodização, como densidade de corrente, tensão, temperatura e concentração eletrolítica (THOMPSON *et al.*, 1999; SHORT; BRYANT, 1975; LEE; PARK, 2014).

Visando melhorar a resistência ao desgaste e a dureza da liga AA6061, este trabalho analisou o efeito da variação da densidade de corrente, com a concentração do eletrólito e o tempo de anodização constantes, realizando ensaios mecânicos e tribológicos.

## 2. Metodologia

Para obter as amostras de AA6061, antes da anodização, as placas passaram por um processo de limpeza física, com uma esponja abrasiva. O procedimento de anodização é apresentado na Figura 1.



**Figura 1. Processo de anodização.**

As amostras passaram por um pré-tratamento, para a remoção de qualquer impureza e da camada de óxido superficial já existente. Logo após isso, as amostras foram anodizadas por 40 minutos, em solução de ácido sulfúrico com concentração de 180 g/l, variando a densidade de corrente em 1,2, 1,5 e 2,0 A/dm<sup>2</sup>. Os parâmetros foram definidos de acordo com a norma ECSS-Q-ST-70-03C (EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION, 2008). Por fim, as amostras foram seladas em água ultrapurificada com uma temperatura de 98 °C.

Em seguida, para a caracterização da amostra utilizou-se o perfilômetro óptico, Wyko NT 1100 da Veeco, para a medida de rugosidade e a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com o aparelho TESCAN MIRA 3, para análise da morfologia de superfície e seção transversal.

O ensaio mecânico realizado envolve a medida da dureza superficial do revestimento, usando um equipamento de microdureza Vickers, DuranScan 50 DS-50 (EMCO-TEST), aplicando uma força de aproximadamente 0,3 kgf. Os ensaios tribológicos abrangem os testes de desgaste por atrito e os testes de esclerometria no tribômetro UMT-2VAC da CETR de acordo com as normas ASTM G133-95 e ASTM C1624-05, respectivamente. No teste de desgaste, o tribômetro *ball-on-flat* possui um movimento linear recíproco e os parâmetros usados são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1. Parâmetros do teste de desgaste.**

<b>Esfera</b>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (6 mm de diâmetro)
<b>Força</b>	3 N
<b>Tempo de teste</b>	1200 s
<b>Velocidade</b>	10 mm/s
<b>Comprimento da trilha</b>	5 mm
<b>Temperatura</b>	20 °C
<b>Umidade relativa</b>	50 – 60 %

O teste de esclerometria foi realizado com uma carga progressiva e os parâmetros são dados na Tabela 2.

**Tabela 2. Parâmetros do teste de esclerometria.**

<b>Carga inicial</b>	0,2 N
<b>Carga final</b>	40 N
<b>Comprimento da trilha</b>	10 mm
<b>Velocidade</b>	0,2 mm/s
<b>Geometria do indentador</b>	120° (cone)
<b>Material do indentador</b>	diamante
<b>Raio da ponta do indentador</b>	200 µm

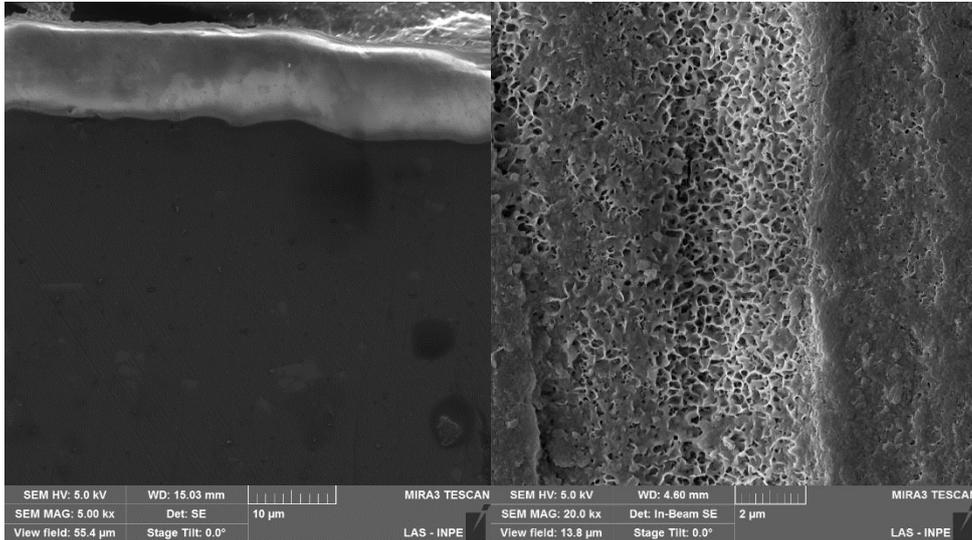
### 3. Resultados e Discussão

As amostras foram anodizadas em temperatura ambiente. A medida da espessura do filme foi feita em três pontos diferentes da amostra, em imagens do corte transversal obtidas por MEV, com valor médio apresentado na tabela 3.

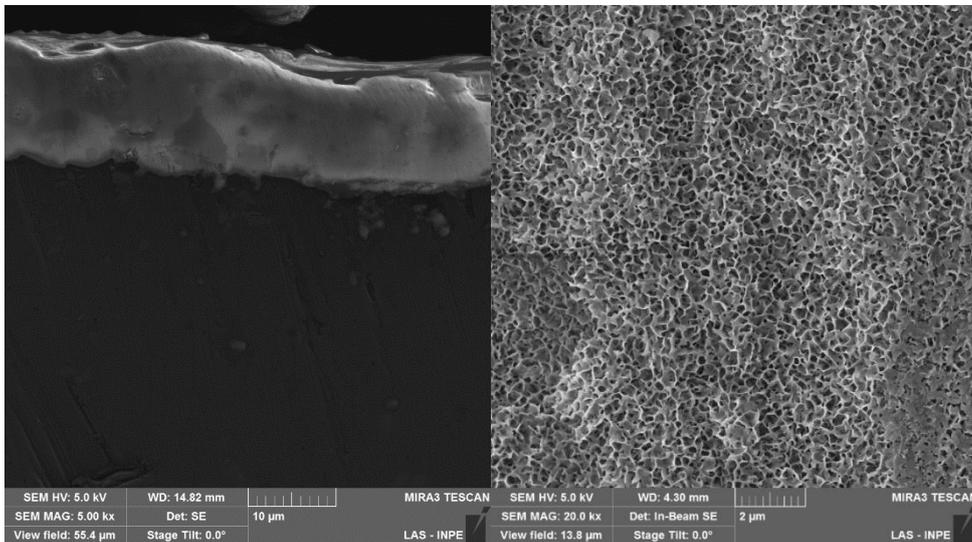
**Tabela 3. Espessura da camada de óxido de alumínio anodizado.**

<b>Densidade de corrente</b>	<b>1,2 A/dm<sup>2</sup></b>	<b>1,5 A/dm<sup>2</sup></b>	<b>2,0 A/dm<sup>2</sup></b>
<b>Espessura (µm)</b>	9,50 ± 0,63	14,74 ± 0,61	15,92 ± 0,68

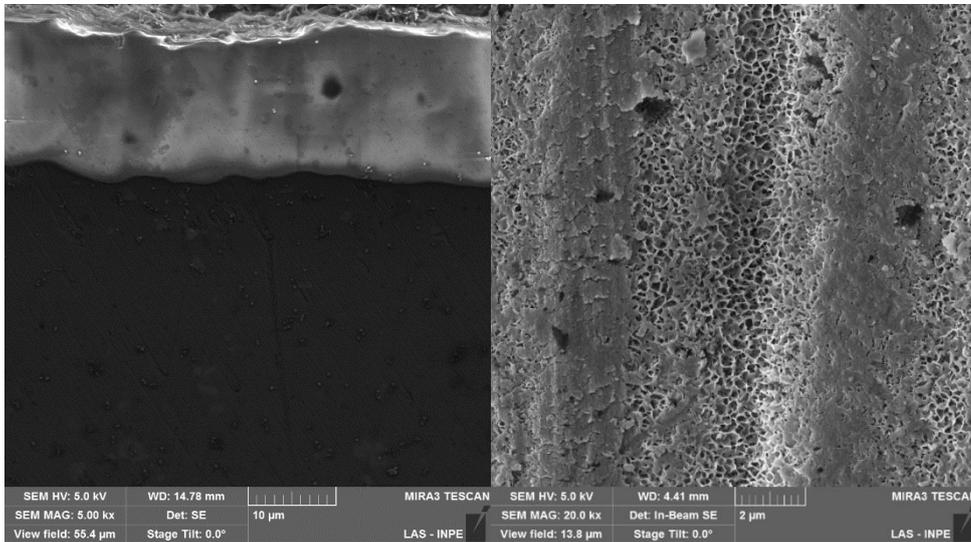
Como esperado, quanto maior a densidade de corrente, maior é a espessura do revestimento. As imagens da micrografia da seção transversal e da superfície anodizada são apresentadas na Figura 2.



(a)



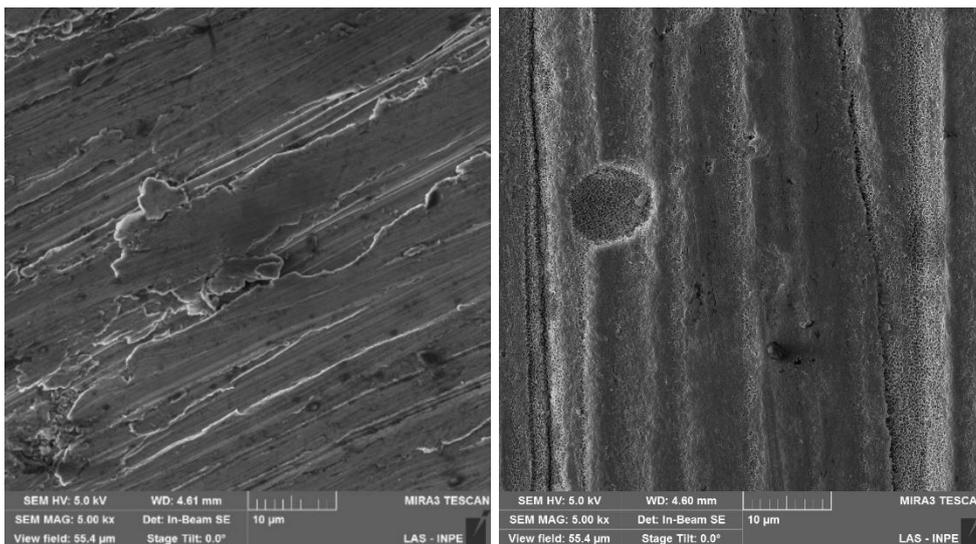
(b)



(c)

**Figura 2. Imagens das amostras anodizadas com ampliação de 5.000 vezes da seção transversal e 20.000 vezes da superfície, respectivamente, e densidade de corrente (a) 1,2 A/dm<sup>2</sup>, (b) 1,5 A/dm<sup>2</sup> e (c) 2,0 A/dm<sup>2</sup>.**

Pode-se visualizar que, a amostra anodizada com densidade de corrente de 1,5 A/dm<sup>2</sup> foi a que apresentou maior homogeneidade de formação de poros. Ao comparar com a Figura 3, observa-se que, essa formação de poros tem preferência nos defeitos pré-existentes na superfície, como nos vales e nos orifícios, que podem ser causados pelo processo de laminação da placa.



(a)

(b)

**Figura 3. Imagem da superfície da amostra da liga de alumínio AA6061 com ampliação de 5.000 vezes (a) sem anodização e (b) anodizada com densidade de corrente 1,2 A/dm<sup>2</sup>.**

A rugosidade da superfície foi medida em uma área de 229 µm x 301 µm em três pontos diferentes de uma mesma amostra, a média das rugosidades obtidas é apresentada abaixo (Tabela 4).

**Tabela 4. Rugosidade da superfície.**

Amostra	1,2 A/dm <sup>2</sup>	1,5 A/dm <sup>2</sup>	2,0 A/dm <sup>2</sup>	Liga AA6061
<b>Rugosidade (µm)</b>	5,72 ± 0,40	6,65 ± 1,04	7,66 ± 0,23	0,52 ± 0,13

As amostras anodizadas aumentaram em pelo menos dez vezes a rugosidade da superfície, em relação à liga sem tratamento, e essa rugosidade aumenta com o aumento da densidade de corrente. Após a caracterização da superfície anodizada, realizou-se os testes de dureza, desgaste e de esclerometria. Nos testes de dureza, realizou-se pelo menos cinco medidas em áreas diferentes de cada amostra e o valor médio das medidas de dureza é dado a seguir (Tabela 5).

**Tabela 5. Microdureza Vickers média.**

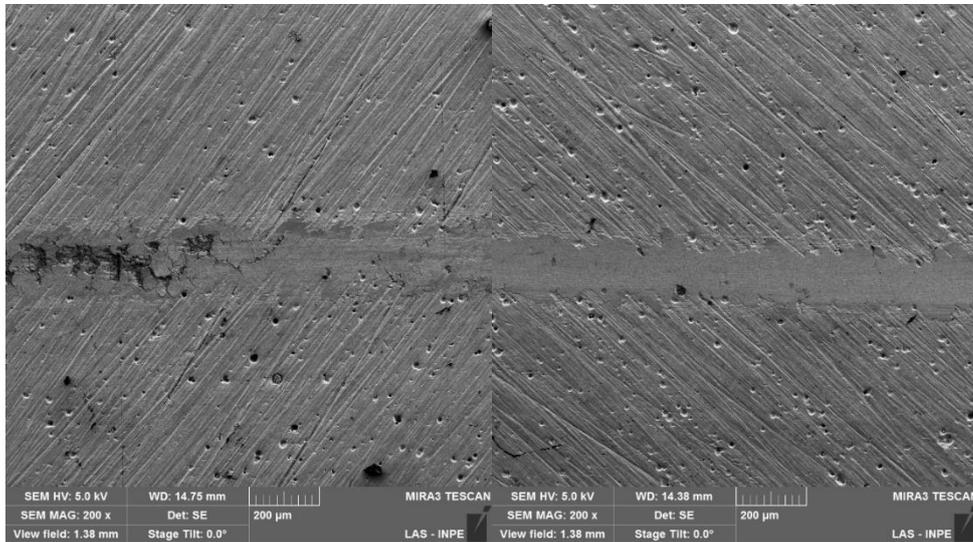
Amostra	1,2 A/dm <sup>2</sup>	1,5 A/dm <sup>2</sup>	2,0 A/dm <sup>2</sup>	Liga AA6061
<b>Dureza (HV)</b>	231,6 ± 23,0	361,6 ± 11,9	336,2 ± 36,4	120,6 ± 2,9

É possível observar que a amostra de 1,5 A/dm<sup>2</sup> apresenta a maior dureza e todas as amostras possuem dureza superficial superior à da liga de alumínio sem tratamento. No teste de desgaste, os ensaios foram realizados em triplicata para cada amostra e o coeficiente de atrito médio é mostrado na Tabela 6.

**Tabela 6. Coeficiente de atrito médio.**

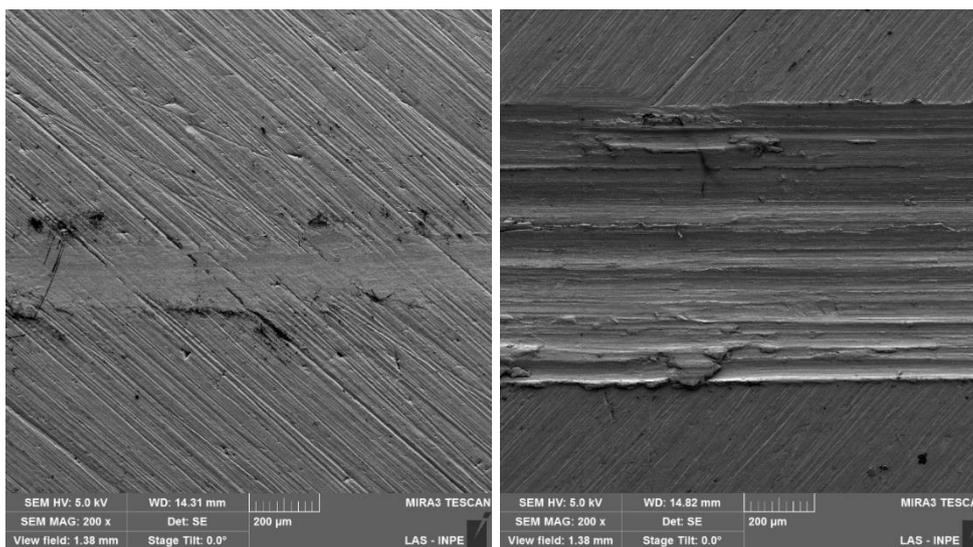
Amostra	1,2 A/dm <sup>2</sup>	1,5 A/dm <sup>2</sup>	2,0 A/dm <sup>2</sup>	Liga AA6061
<b>COF</b>	0,64 ± 0,12	0,75 ± 0,02	0,60 ± 0,02	0,53 ± 0,01

A partir da tabela 5, observa-se que a amostra de 1,5 A/dm<sup>2</sup> é a que apresenta o maior coeficiente de atrito médio, o que pode ter sido ocasionado pela formação de poros mais homogêneos na superfície. A Figura 4 apresenta as trilhas formadas no teste de desgaste.



(a)

(b)



(c)

(d)

**Figura 4. Imagens das trilhas das amostras anodizadas com ampliação de 200 vezes e densidade de corrente (a) 1,2 A/dm<sup>2</sup>, (b) 1,5 A/dm<sup>2</sup>, (c) 2,0 A/dm<sup>2</sup> e (d) liga AA6061.**

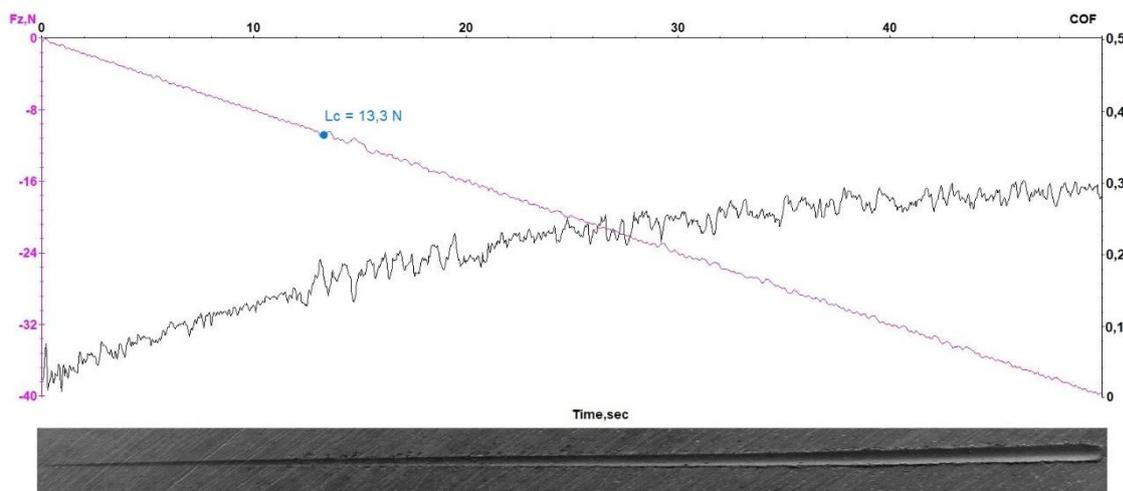
Ao comparar as trilhas, observa-se que todas as trilhas das amostras anodizadas foram desgastadas superficialmente em relação à liga sem tratamento. Para confirmar os dados, mediu-se a largura e a profundidade das trilhas e as medições são dadas abaixo (Tabela 7).

**Tabela 7. Profundidade e largura das trilhas.**

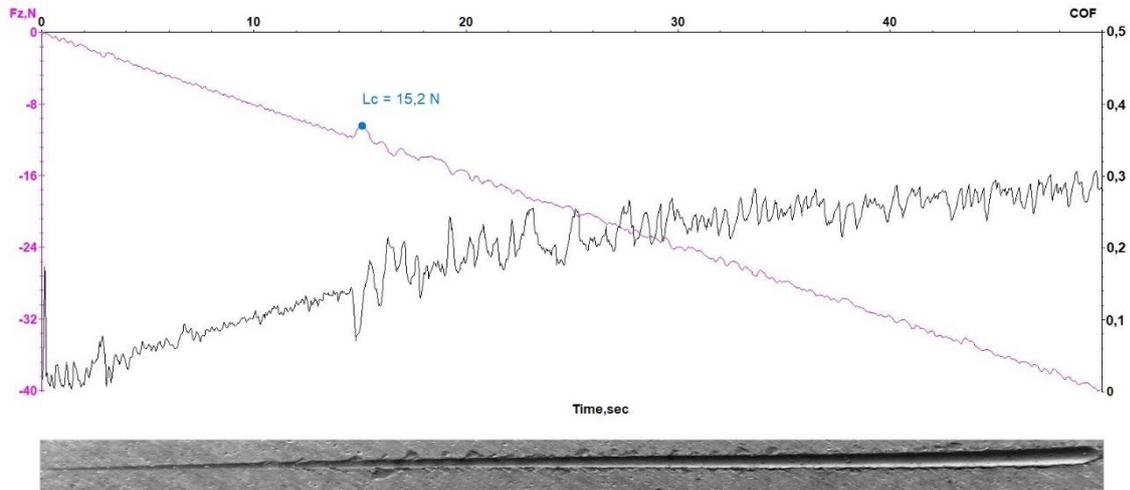
Amostras	1,2 A/dm <sup>2</sup>	1,5 A/dm <sup>2</sup>	2,0 A/dm <sup>2</sup>	Liga AA6061.
<b>Profundidade (μm)</b>	-	-	-	48,23
<b>Largura (μm)</b>	200	210	230	780

A análise do perfil da trilha no perfilômetro mecânico confirmou o baixo desgaste das amostras anodizadas. As medidas da profundidade dessas trilhas não foram apresentadas, pois o valor se confunde com a rugosidade da superfície das amostras.

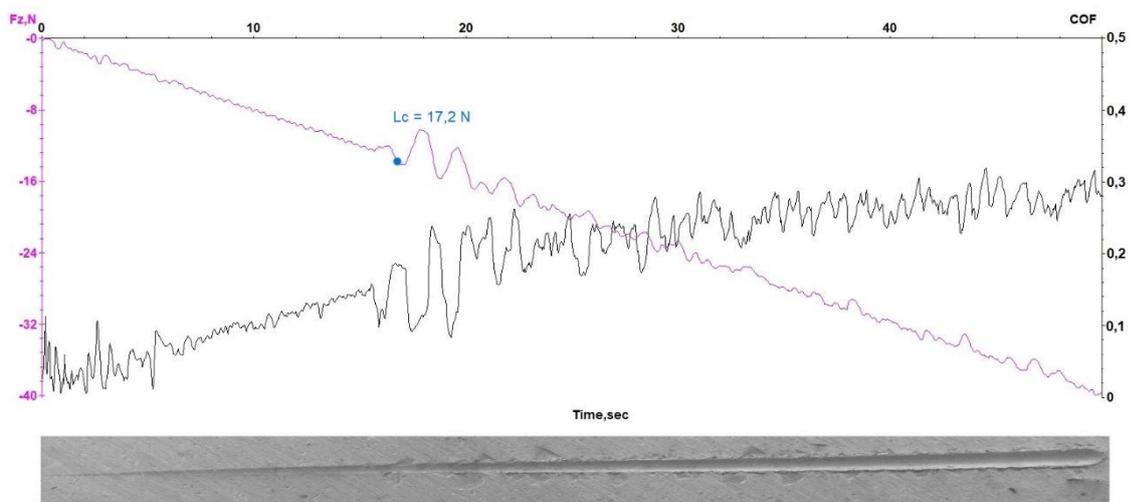
Após isso, foi realizado o teste de esclerometria com carga progressiva para determinação da carga crítica 1 (Lc1), aquela em que ocorre a primeira falha reconhecível (uma trinca no revestimento). Os gráficos e as imagens das trilhas são mostrados na Figura 5.



(a)



(b)



(c)

**Figura 5. Imagens dos gráficos de esclerometria das amostras anodizadas juntamente com as imagens MEV das trilhas, com densidade de corrente (a) 1,2 A/dm<sup>2</sup>, (b) 1,5 A/dm<sup>2</sup> e (c) 2,0 A/dm<sup>2</sup>.**

Observa-se que, quanto maior a densidade de corrente aplicada, maior é a força crítica ( $L_{c1}$ ) obtida. O revestimento com maior  $L_{c1}$  é o revestimento que possui maior espessura e o menor coeficiente de atrito: a amostra anodizada com 2,0 A/dm<sup>2</sup>.

#### 4. Conclusão

Ao comparar os dados da liga de alumínio AA6061 com as amostras anodizadas, observou-se que todas as amostras obtiveram um desempenho mecânico e tribológico superior ao da liga sem tratamento, levando-se em consideração que a rugosidade da superfície da amostra também aumenta. Nenhum dos revestimentos apresentou formação de trincas, porém, apresentam superfícies não-homogêneas.

O revestimento da amostra anodizada com densidade de corrente de 1,5 A/dm<sup>2</sup> obteve maior dureza e maior coeficiente de atrito, também apresentou uma maior homogeneidade em relação à formação dos poros na superfície. Já o revestimento da amostra anodizada com 2,0 A/dm<sup>2</sup> apresentou o melhor desempenho no teste de esclerometria, possuindo também a maior rugosidade, maior espessura e o menor coeficiente de atrito. A amostra anodizada com 1,2 A/dm<sup>2</sup> apresentou a trilha de menor largura e menor rugosidade superficial. Com isso, pode-se concluir que a amostra com melhor performance, incluindo todas as análises, é a amostra anodizada com densidade de corrente de 2,0 A/dm<sup>2</sup>.

***Agradecimentos:** Esta pesquisa contou com o apoio da CAPES, com o auxílio do Laboratório de Tratamentos de Superfície (INPE), Laboratório Associado de Sensores e Materiais (INPE) e ao Laboratório de Materiais (ITA).*

#### Referências

- ASTM C1624-05, Standard Test Method for Adhesion Strength and Mechanical Failure Modes of Ceramic Coatings by Quantitative Single Point Scratch Testing
- ASTM G133-95, Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-flat Sliding Wear.
- EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION. Space product assurance: black-anodizing of metals with inorganic dyes. ECSS, 2008.
- GUO, F.; CAO, Y.; WANG, K.; ZHANG, P. CUI, Y.; HU, Z.; XIE, Z. Effect of the Anodizing Temperature on Microstructure and Tribological Properties of 6061 Aluminum Alloy Anodic Oxide Films. **Coatings** v. 314, 2022.
- LEE, W.; PARK, S. Porous anodic aluminum oxide: anodization and templated synthesis of functional nanostructures. *Chemical Reviews*, v. 114, n. 15, p. 7487–7556, 2014.
- MOHITFAR, S.; MAHDAVI, S.; ETMINANFAR, M. KHALIL-ALLAF J. Characteristics and tribological behavior of the hard anodized 6061-T6 Al alloy. *Journal of Alloys and Compounds* v. 842, 2020.
- SHORT, E.; BRYANT, A. Review of some defects appearing on anodized aluminium. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, v. 53, n. pt 4, p.169–177, 1975.
- THOMPSON, G. E. et al. Anodizing of aluminium alloys. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, v. 71, n. 3, p. 228-238, 1999.