

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Aeroespacial

Anodização e Caracterização da Liga de Alumínio 6351 T6

Autor: Bianca Lemos Lessa
Professor: Prof. Rhander Viana

Brasília, DF
Novembro de 2021



Bianca Lemos Lessa

Anodização e Caracterização da Liga de Alumínio 6351 T6/ Bianca Lemos Lessa. – Brasília, DF, Novembro de 2021-
35 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Rhander Viana

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , Novembro de 2021.

1. Anodização. 2. Alumínio 6351 T6. 3. Corrosão. I. Prof. Rhander Viana.
II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Anodização e
Caracterização da Liga de Alumínio 6351 T6

CDU 02:141:005.6

Bianca Lemos Lessa

Anodização e Caracterização da Liga de Alumínio 6351 T6

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Aeroespacial) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Aeroespacial).

Trabalho aprovado. Brasília, DF, Novembro de 2021:

Prof. Rhander Viana
Orientador

MSc. Danilo dos Santos Oliveira
Convidado 1

Eng. João Carlos Wohlgemuth
Convidado 2

Brasília, DF
Novembro de 2021

Lista de ilustrações

Figura 1 – Pilha de corrosão eletroquímica.	14
Figura 2 – Corpo de prova.	15
Figura 3 – Dimensões do corpo de prova.	16
Figura 4 – Esquemático da camada porosa formada na superfície do alumínio . . .	19
Figura 5 – Rugosímetro utilizado para aferir dados sobre a rugosidade.	25
Figura 6 – Microdurômetro utilizado para aferir dados sobre a microdureza <i>Vickers</i>	26
Figura 7 – Sequência de anodização da amostra de alumínio 6351 T6.	29
Figura 8 – Caracterização superficial da amostra de alumínio 6351 T6 lixada, antes da anodização.	30
Figura 9 – Caracterização superficial da amostra de alumínio 6351 T6 lixada, depois da anodização	31
Figura 10 – Resultado dos ensaios de rugosidade média da amostra de alumínio 6351 T6.	32
Figura 11 – Resultado dos ensaios de microdureza <i>Vickers</i> da amostra de alumínio 6351 T6.	33

Lista de tabelas

Tabela 1 – Aplicabilidade relacionada ao tamanho da camada de óxido.	12
Tabela 2 – Dimensões do corpo de prova.	22
Tabela 3 – Propriedade Mecânicas do corpo de prova.	22
Tabela 4 – Propriedade Físicas do corpo de prova.	22
Tabela 5 – Parâmetros para a Anodização.	24
Tabela 6 – Cronograma para realização do estudo.	28

Lista de abreviaturas

A_s	Área de Superfície
B	Base
°C	Graus Celsius
d	Densidade de Corrente
DC	Densidade Média de Corrente Aproximada
é	Elétron
EPIs	Equipamentos de Proteção Individual
FGA	Faculdade do Gama
H	Altura
L	Largura/Espessura
M	Massa
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
Ra	Rugosidade média
Rq	Rugosidade média quadrática
Rz	Média das alturas máximas do perfil
t	Tempo
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UV	Raios Ultravioletas
V	Volume

Lista de Fórmulas Químicas

Al	Elemento Químico Alumínio
Al_2O_3	Fórmula Química da Alumina
$Al_2(SO_4)_3$	Fórmula Química do Sal Sulfato de Alumínio
H	Elemento Químico Hidrogênio
H^+	Fórmula Química do Cátion de Hidrônio
H_2	Fórmula Química do Gás Hidrogênio
H_2O	Fórmula Química da Água
H_2SO_4	Fórmula Química do Ácido Sulfúrico
$NaOH$	Hidróxido de Sódio
O_2	Fórmula Química do Gás Oxigênio
OH^-	Fórmula Química do Ânion de Hidróxido
SO_4^{2-}	Fórmula Química do Sulfato

Resumo

A anodização é um processo eletroquímico cujo objetivo é formar uma camada de óxido na superfície de um metal, por meio da imersão em um banho eletrolítico, a fim de protegê-lo contra a abrasão e corrosão. Desse modo, o objetivo desse trabalho é submeter corpos de prova de uma liga de alumínio 6351 T6 a esse processo. Dessa forma, será possível fazer um estudo sobre esse tratamento, além da caracterização da liga após o processo. Isso será feito por meio da medição da rugosidade, dureza e investigação da textura da superfície, antes e depois da aplicação do procedimento.

Palavras-chaves: Anodização, Alumínio 6351 T6, Corrosão.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Apresentação do Trabalho	10
1.2	Objetivos	11
1.2.1	Objetivo Geral	11
1.2.2	Objetivo Específico	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1	Processo de Anodização e suas Aplicações	12
2.2	Anodização do Alumínio	13
3	ESTUDO DE CASO	15
3.1	Reações Químicas no Processo de Anodização do Alumínio	16
3.2	Formação de Óxido na Anodização de Alumínio	18
3.3	Caracterização Superficial de Alumínio Anodizado	19
3.3.1	Acabamento Superficial: Rugosidade	20
3.3.2	Microdureza	20
3.3.3	Morfologia: Microscopia Confocal	21
4	METODOLOGIA	22
4.1	Preparação das amostras	22
4.2	Processo de Anodização do Alumínio	23
4.3	Parâmetros da Anodização	23
4.3.1	Cálculo da Densidade de Corrente	24
4.4	Ensaio de Rugosidade	25
4.5	Ensaio de Microdureza	25
4.6	Ensaio de Morfologia	26
4.7	Coloração	26
4.7.1	Selagem	27
4.8	Cronograma	27
5	RESULTADOS	29
5.1	Caracterização Superficial	29
5.2	Ensaio de Rugosidade	31
5.3	Ensaio de Microdureza Vickers	32
6	CONCLUSÃO	34

REFERÊNCIAS 35

1 Introdução

1.1 Apresentação do Trabalho

Atualmente, o alumínio e suas ligas são utilizados em diversos setores da sociedade, seja na indústria automotiva, marítima ou aeroespacial, no setor de transporte, ou em embalagens e utensílios domésticos. Isso ocorre devido às características vantajosas presentes nesse metal, como a alta resistência relacionada a um baixo peso, boa condutividade térmica e elétrica, dentre outras.

Ao ser posto em contato com o ambiente, uma fina camada de óxido será formada na superfície do alumínio devido à exposição ao oxigênio e à umidade presente no ar atmosférico. Essa película é fina e promove uma proteção ao metal contra agentes corrosivos externos.

A camada de óxido formada na superfície do alumínio apresenta espessura e dureza variável, uma vez que é formada naturalmente. Porém, o metal não estará protegido contra agentes externos mais abrasivos. Dessa forma, se faz necessário submeter a peça a tratamentos de superfície e, um dos existentes, é a anodização.

A anodização é um processo simples, o qual irá promover uma proteção duradoura, além de permitir uma maior durabilidade ao preservar a peça esteticamente com um acabamento uniforme, ao eliminar irregularidades superficiais originadas por operações anteriores. Ademais, uma das vantagens desse método é a ausência de condução elétrica do metal e a possibilidade de coloração, de modo a aprimorar a estética do produto.

Dessa forma, a anodização é um método cuja finalidade é a criação forçada e acelerada de uma camada de óxido na superfície de um metal, de modo a protegê-lo contra a abrasão e corrosão. Esta é produzida de forma controlada e uniforme por meio da imersão em um banho eletrolítico no qual a peça a anodizar é ligada ao polo positivo de uma fonte de eletricidade. Em decorrência disso, esse tratamento é denominado anodização pelo material a ser revestido atuar como ânodo. (DAVIS, 1993)

Apesar de ser um tratamento mais comum em peças de alumínio, também é possível fazer esse tratamento em produtos feitos de titânio, nióbio, tântalo, tungstênio, zircônio, háfnio, zinco e magnésio.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Esse trabalho tem como objetivo geral o estudo da anodização realizada em corpos de prova de uma liga de alumínio 6351 T6. Ademais, será feita uma investigação das características resultantes do tratamento por meio de ensaios e testes laboratoriais, de modo a confirmar o sucesso deste por comparação dos dados da amostra anterior e posteriormente ao experimento.

1.2.2 Objetivo Específico

Os testes a serem feitos irão incluir a medição da rugosidade, microdureza e a investigação da textura da superfície, antes e depois da anodização.

A rugosidade será medida por meio de um rugosímetro o qual irá fornecer dados para constatar a mudança da superfície durante o processo. Serão feitas três varreduras de rugosidade.

Já a microdureza será medida por meio de um microdurômetro. A escala de microdureza a ser utilizada é a *Vickers*, de modo a fornecer dados mais precisos para comparação dos resultados.

Por fim, a investigação da textura da superfície será feita por meio da microscopia confocal. Com isso, será possível observar a formação de poros e se há riscos de lixamento após a preparação da peça, uma vez que ela deverá ser propriamente lixada e polida.

2 Referencial Teórico

2.1 Processo de Anodização e suas Aplicações

A anodização é um dos métodos mais utilizados por apresentar uma ótima relação entre custo e efetividade. Seu foco está na produção de peças duráveis e resistentes à corrosão e desgastes. Além disso, fornece uma superfície com resistência elétrica e impermeável. Este tratamento apresenta diversas aplicações na área da indústria, no setor de automóvel, aviação, joalheria, eletrônica, armamento, construção de edifícios, e engloba áreas com aplicações navais, energéticas e na medicina, por exemplo.

Nesse processo diversas variáveis são consideradas, como a valor da densidade de corrente a ser aplicada, a composição da solução, sua concentração e temperatura, por exemplo. É possível alterá-las de modo a obter resultados diferentes. Ademais, esse método também garante uma maior adesão da tinta durante o processo de tingimento, caso seja feita a coloração da peça. (DONG, 2010)

Uma das características da anodização é a variação da espessura da camada de óxido a ser formada. Esse parâmetro está diretamente relacionado com a corrente e o tempo de tratamento e pode variar entre 5 a 100 μm , de acordo com a sua aplicabilidade. Este fator pode ser observado na tabela 1.

Tabela 1 – Aplicabilidade relacionada ao tamanho da camada de óxido.

Uso interno	3 a 8 μm
Uso arquitetônico ou abrasivos	10 a 20 μm
Uso industrial	50 a 100 μm

Dentre os processos de anodização, três se destacam, a natural, a brilhante e a dura. A primeira corresponde a formação do filme de óxido com uma aparência mais fosca, cujo objetivo é proteger e melhorar a estética do material. Da mesma forma que o anterior, a anodização brilhante tem a mesma finalidade, porém irá produzir uma camada mais polida e luminosa. Por fim, a anodização dura será aplicada industrialmente, pois apresenta uma película mais resistente, com células mais largas e poros pequenos. (CASTRO, 2012)

Existem dois tipos de anodização e elas se diferem por meio da solução a ser utilizada. Ao utilizar uma com composição neutra é possível obter um revestimento com uma microestrutura compacta e não porosa. Ao passo que se for utilizada uma ácida, obtém-se um revestimento poroso. Para o primeiro caso podem ser usadas soluções de borato, citrato e fosfato, as quais são usadas comercialmente em capacitores. Já para

o segundo podem ser usadas soluções de ácidos fortes como o sulfúrico, por exemplo. (GHALI, 2010)

Para soluções com composição ácida, os poros formados são classificados quanto à espessura do revestimento, diâmetro e distância entre eles. Dessa forma, apresentam aplicações no desenvolvimento de dispositivos avançados para detecção química, biossensores, armazenamento de energia, filtros moleculares, dentre outros. (SULKA, 2008)

De forma a determinar a qualidade do filme de óxido a ser criado, faz-se necessário um certo controle dos parâmetros do banho de anodização, de modo a produzir camadas duras ou brandas, porosas ou compactas, espessas ou finas, a depender da aplicação.

2.2 Anodização do Alumínio

O alumínio é o metal mais abundante na crosta terrestre e, atualmente, apresenta uma multiplicidade de aplicações devido à sua leveza e elevada resistência. Quando uma peça, feita a partir deste elemento, é submetida ao contato com oxigênio e umidade do ar, ela sofrerá oxidação e, conseqüentemente, uma fina camada de óxido será formada. (OLIVEIRA, 2016)

Durante essa oxidação do alumínio será formada um filme de óxido sobre a superfície do metal denominado alumina, o qual é representado pela fórmula química Al_2O_3 . A espessura dessa camada varia entre 0,002 a 0,05 μm . Essa película, que é formada naturalmente, favorece a peça, pois é rígida, impermeável, isolante elétrica e estabiliza a superfície ao evitar um maior contato com o ambiente. (XU Y.; THOMPSON, 1982)

Porém, por ser muito fina, essa camada não protege contra agentes externos mais agressivos e ocasionam corrosão, assim, diminuirão a resistência da peça. Por essa proteção ser necessária em aplicações industriais, faz-se essencial a realização de um tratamento de superfície chamado anodização. Esse método tem por finalidade acelerar e controlar a formação da camada de óxido de alumínio na sua superfície.

Por se tratar de um processo eletroquímico, a anodização é classificada, também, como um método corrosivo, uma vez que provoca a oxidação do metal. Dessa forma, para a sua realização, é necessário a definição de um sistema composto por uma área anódica - onde ocorrerá a reação de oxidação - e uma catódica - onde ocorrerá a reação de redução -, um eletrólito - que é a solução a ser utilizada - e ligações elétricas, as quais irão unir as duas áreas, como demonstrado na figura 1.

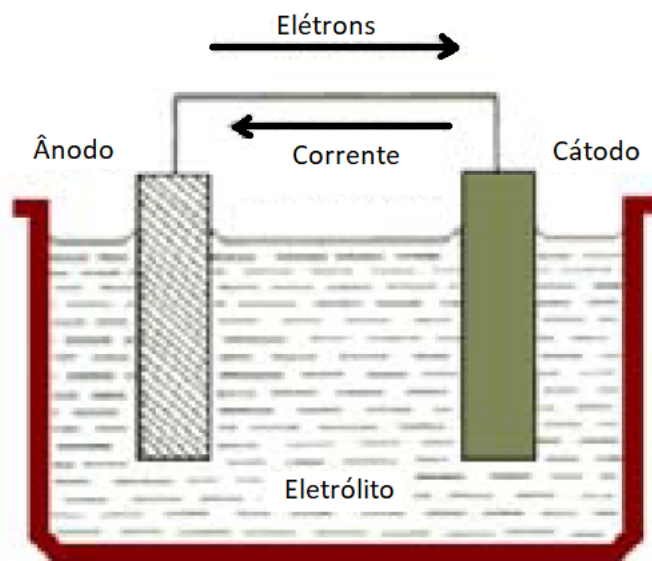


Figura 1 – Pilha de corrosão eletroquímica.

Quando a anodização é feita com uma solução ácida, a partir do ácido sulfúrico, ácido fosfórico, ácido oxálico ou ácido crômico, a camada de óxido formada na superfície será porosa. A mais utilizada é a de ácido sulfúrico por apresentar alta disponibilidade e baixo custo, se comparado com as outras opções. A camada porosa a ser formada melhora as propriedades químicas e mecânicas do metal e suas ligas, e apresenta uma estrutura capaz de garantir uma maior adesão de substâncias líquidas, compostos orgânicos, corantes, etc. (REDA M.; MAGD, 1997)

Dessa forma, a anodização do alumínio possui diversas vantagens, pois permite uma maior durabilidade da peça. Garante uma estabilidade da cor, evitando o desgaste e o desbotamento. Apresenta facilidade de manutenção por fornecer uma limpeza desse metal com produtos de fácil acesso, além de ser resistente caso esses sejam mais corrosivos. Tem-se uma preservação da estética ao manter o aspecto metálico e duradouro. Não há necessidade de um grande investimento para fazer o tratamento, logo os custos iniciais são baixos. E, por fim, é um tratamento seguro, pois não é prejudicial à saúde uma vez que garante uma resistência às altas temperaturas, então não se decompõe, logo, não será tóxico.

3 Estudo de caso

O estudo da anodização no presente trabalho será feito a partir de um corpo de prova composto pela liga de alumínio 6351 T6, representado pela figura 2. Este metal apresenta uma ótima usinabilidade, possui uma alta resistência mecânica, tem boa conformabilidade, alta resistência à corrosão e é apropriado para anodização. Sua principal aplicação é em componentes diversos para construção mecânica, como em engrenagens, buchas, coroas, macaís, etc.

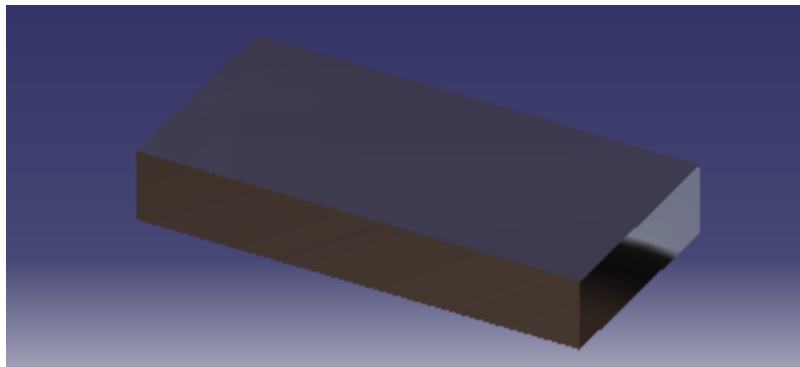


Figura 2 – Corpo de prova.

A amostra a ser analisada tem 40 mm de comprimento, 20mm de largura, 6,35 mm de espessura e apresenta uma massa de 13,85 gramas, como demonstrado na figura 3.

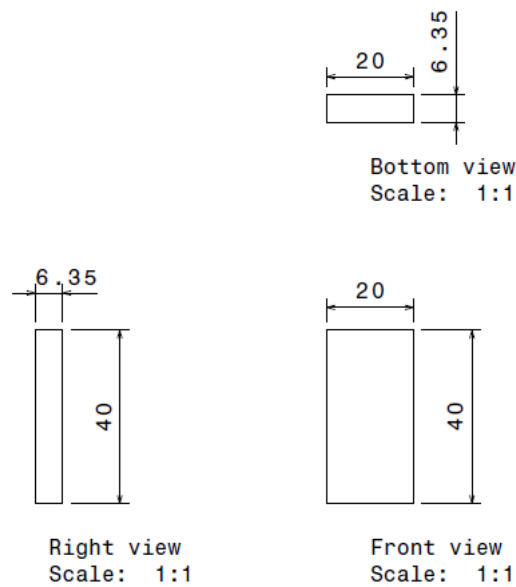


Figura 3 – Dimensões do corpo de prova.

Com essas informações é possível calcular a densidade (ρ) a partir da equação 3.1.

$$\rho = M/V \quad (3.1)$$

A massa (M) está em gramas. O volume (V), em mm^3 , é calculado considerando as dimensões do corpo de prova.

$$V = B \times H \times L \quad (3.2)$$

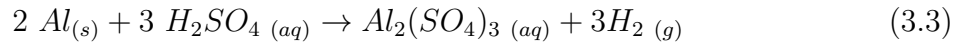
Onde B é a base, correspondente à 20 mm, H é a altura com 40 mm, e L é a largura, ou espessura, igual a 6,35 mm. Substituindo esses valores na Equação 3.2, tem-se um volume de $2,72 \text{ g/cm}^3$. Esse valor é similar ao encontrado na literatura, referente a $2,71 \text{ g/cm}^3$.(INFORMACOES... , 2021)

3.1 Reações Químicas no Processo de Anodização do Alumínio

Neste trabalho será utilizada a solução presente em baterias automotivas, uma vez que já apresenta titulação pré-determinada (aquosa, com 30% de concentração de ácido sulfúrico, representado pela fórmula química H_2SO_4).

Por se tratar de um processo eletroquímico, a anodização apresentará diferentes reações no cátodo e no ânodo da célula eletrolítica. Ao inserir a peça de alumínio em uma

solução com ácido sulfúrico, haverá a formação do sulfato de alumínio e a liberação de hidrogênio, como demonstrado na Equação 3.3.

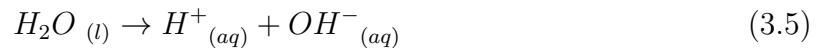


A Equação 3.3 é classificada como uma equação de simples troca, pois representa uma reação entre uma substância simples com uma composta. Dessa forma, ao reagir o ácido sulfúrico com o alumínio metálico tem-se a formação do sal de sulfato de alumínio $[Al_2(SO_4)_3_{(aq)}]$ e gás hidrogênio $[H_2_{(g)}]$.

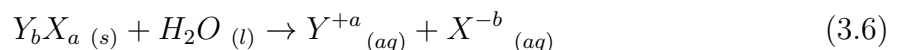
A semi-reação que forma o H_2 é correspondente à Equação 3.4. Essa reação ocorre no cátodo da célula eletrolítica.



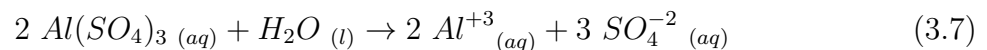
Durante a formação do sal, observa-se uma reação chamada hidrólise salina. Essa ocorre sempre que é dissolvido um sal em água, o que resulta em um ácido e uma base fracos. A água durante esse processo sofre autoionização, produzindo um cátion de hidrônio (H^+) e um ânion de hidróxido (OH^-), como demonstrado na Equação 3.5.



Um sal ao entrar em contato com água irá dissolver e sofrerá um processo chamado dissociação, de modo que há a liberação dos íons (cátion e ânion), presentes no sal. A equação geral de dissociação de um sal pode ser observada na Equação 3.6.



Dessa forma, é possível observar a dissociação do sal de alumínio em água pela Equação 3.7.



Onde,

$$Y = Al;$$

$$b = 2;$$

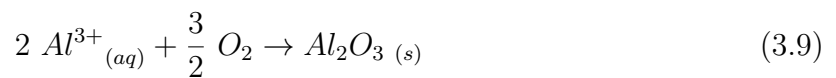
$$X = SO_4;$$

$$a = 3.$$

A partir da Equação 3.7, tem-se a semi-reação do alumínio, a qual está representada pela Equação 3.8. Esta reação ocorre no ânodo da célula eletrolítica.



Dessa forma, ao obter o sulfato de alumínio com a Equação 3.3, tem-se a sua dissociação na Equação 3.7. Como produto dessa reação, gera-se o cátion do alumínio representado pela Equação 3.8. A reação desse cátion com gás oxigênio gera a alumina, demonstrada pela Equação 3.9.



3.2 Formação de Óxido na Anodização de Alumínio

A anodização é uma oxidação forçada e controlada, desse modo, o seu principal objetivo é formar uma camada de óxido de alumínio denominado alumina (Al_2O_3). Essa película é produzida na superfície do metal por meio da eletrólise.

Quando se realiza a anodização em um metal, é possível formar dois tipos de camada, uma com poros e outra sem. A qualidade destas camadas depende da pureza e do pré-tratamento do metal. O que determinará essa diferença é a composição da solução eletrolítica. Para se obter um revestimento não poroso, utiliza-se soluções neutras como as de borato, citrato e fosfato. Em contraste, para a formação de um filme poroso, são usadas soluções ácidas como as de ácido sulfúrico, oxálico e fosfórico. As soluções de ácido sulfúrico são as mais utilizadas, pois apresentam uma melhor relação entre custo e desempenho.

Neste presente trabalho, será feita a anodização do alumínio utilizando uma solução de ácido sulfúrico. Por ser um ácido agressivo, ocasionará em uma camada mais porosa e mais resistente, ao ser comparado com outros tipos de ácidos.

Dessa forma, a camada porosa a ser formada na superfície é caracterizada por ter uma disposição de células hexagonais, cada uma delas com um poro central perpendicular à superfície, com dimensões variando de acordo com a composição do banho, temperatura e tensão. Ademais, no fundo dos poros, tem-se uma camada de barreira, a qual é compacta, amorfa, e separa o filme de óxido do metal, como demonstrado na figura 4.

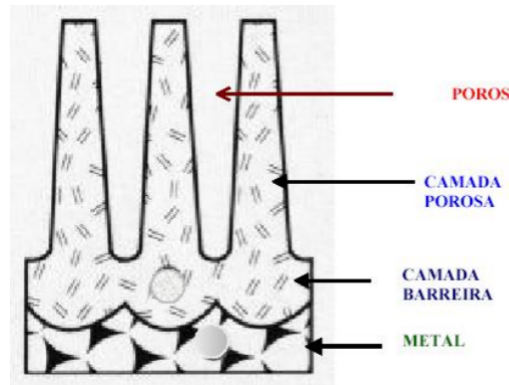


Figura 4 – Esquemático da camada porosa formada na superfície do alumínio

A formação da camada porosa no alumínio dependerá, além do tipo de solução, da densidade de corrente, temperatura, voltagem, tempo de anodização e agitação.

A densidade de corrente é diretamente proporcional à velocidade de formação da camada e, conseqüentemente, à espessura final desta. Ou seja, quanto maior for a densidade de corrente, maior será a velocidade de formação da camada e, assim, aumentará a sua espessura.

Em temperaturas mais baixas, entre 0° a 5° C, o revestimento será mais resistente e compacto, ao passo que em temperaturas mais elevadas, entre 60° a 75° C, o filme será mais fino e terá menos resistência. Dessa forma, a temperatura altera a dissolução da camada, ocasionando no fenômeno chamado pulverulência.

Ao alterar a voltagem é possível alterar o tamanho das células. Baixas voltagens geram poros pequenos, enquanto altas voltagens geram poros maiores.

Além disso, ao modificar a relação corrente *versus* tempo, modifica-se a espessura da camada. Isso ocorre devido ao aumento da exposição da peça na solução. Essa relação é observada na equação 3.10, onde t é o tempo em minutos, L é a espessura, ou largura, da camada a ser formada em micrômetros (μm), e d é a densidade de corrente em A/dm^2 .

$$t = \frac{L}{0,3 \times d} \quad (3.10)$$

Por fim, a agitação da solução permitirá uma maior homogeneização da temperatura, de modo a evitar a concentração de calor em um ponto da peça, o que pode promover diferentes características em partes diferentes da peça.

3.3 Caracterização Superficial de Alumínio Anodizado

Após a anodização do alumínio, serão feitos testes de modo a investigar a superfície do metal, a fim de observar e comparar as mudanças da amostra anterior e posteriormente

ao experimento.

3.3.1 Acabamento Superficial: Rugosidade

Todo corpo de prova apresenta irregularidades na sua superfície se for observado em detalhes. Isso ocorre devido à ferramenta utilizada para preparação deste. Esses defeitos também são causados pelo contato com outro objeto ou pelo mal uso. Se amplificados, estes representam estruturas ainda menores, pequenos picos e vales. Dessa forma, a morfologia da superfície é denominada rugosidade da peça.

A rugosidade é responsável por influenciar certas propriedades, como a resistência à corrosão, por exemplo. Essas propriedades são alteradas por meio de um acabamento superficial.

Dessa forma, a rugosidade está diretamente ligada à qualidade da peça a ser produzida. Esse parâmetro é quantificado na topografia de uma superfície, ou seja, quanto mais plana for essa superfície menor o valor encontrado.

Para representar a rugosidade de uma superfície, utiliza-se de diversos parâmetros, sendo os principais, a rugosidade média (R_a), a rugosidade média quadrática (R_q) e a média das alturas máximas do perfil (R_z).

A rugosidade média (R_a) considera as características das deformidades da superfície da peça. Por se tratar de uma generalização, ela não permite diferenciar o perfil que está sendo analisado. Além disso, ela não fornece nenhuma informação quanto à sua robustez ou fragilidade. Porém, é o parâmetro mais utilizado durante o controle no processo produtivo, onde podem ocorrer mudanças graduais no acabamento superficial.

A rugosidade média quadrática (R_q), também conhecida por RMS (*Root Mean Square*), representa o desvio padrão da distribuição das alturas da superfície em relação à linha média. Esse parâmetro possui uma maior vantagem em relação ao anterior, uma vez que garante uma maior detecção dos picos e vales presentes na superfície analisada.

Por fim, a média das alturas máximas do perfil (R_z) representa a média das altura entre os pontos máximo e mínimo do perfil. Dessa forma, esse parâmetro informa a distribuição média da superfície vertical e é mais sensível às mudanças no acabamento superficial, se comparado com o R_a , o que o torna útil no controle do processo produtivo.

3.3.2 Microdureza

Conhecer as propriedades mecânicas de um material é de grande importância, pois viabiliza o estudo a ser realizado. Existem diversos ensaios mecânicos para a determinação das características do corpo de prova. Dentre esses, o ensaio de dureza é um dos mais importantes e aplicados.

A dureza de um material é a propriedade a qual está diretamente relacionada com a sua resistência à flexão ou deformação permanente (W.D., 2012). Dentre os métodos de determinação desse parâmetro, os principais é o *Vickers*.

No ensaio *Vickers* é aferida a microdureza da peça, a qual realizará a medida da dureza de formações microscópicas. Esse método considera a relação ideal entre o diâmetro da esfera do penetrador e o diâmetro da calota esférica obtida. Esse procedimento baseia-se na resistência do material à penetração de uma pirâmide de diamante com base quadrada e ângulo de 136° entre faces, sob uma determinada carga. É considerado o método mais completo por apresentar maior abrangência dentre todas as escalas.

3.3.3 Morfologia: Microscopia Confocal

Para a investigação de uma superfície, faz-se necessária a visualização das características do meio a ser estudado. Para que isto seja feito, utiliza-se da análise morfológica da superfície. Um dos principais métodos utilizados é a microscopia confocal.

A microscopia confocal tem como objetivo obter imagens com alta resolução por meio de cortes ópticos, os quais são agrupados de modo a reconstruir tridimensionalmente a topografia da amostra analisada. Ademais, permite um maior aumento do contraste da imagem microscópica, possibilitando assim uma maior observação da superfície a ser estudada. (MICROSCOPIA... , 2021)

4 Metodologia

4.1 Preparação das amostras

Os corpos de prova foram obtidos a partir do corte em jato d'água de uma placa de metal composta pela liga de alumínio 6351 T6. As amostras apresentam as dimensões demonstradas na tabela 2.

Tabela 2 – Dimensões do corpo de prova.

Comprimento	40 mm
Largura	20 mm
Espessura	6,35 mm

Essa liga apresenta composição, propriedades mecânicas e físicas representadas pelas tabelas 3 e 4, respectivamente. (ALUMINIO..., 2021)

Tabela 3 – Propriedade Mecânicas do corpo de prova.

Limite de Escoamento	260 MPa
Limite de Resistência à Tração	300 MPa
Alongamento	10%
Dureza	95 HB

Tabela 4 – Propriedade Físicas do corpo de prova.

Densidade	2,71 g/cm^3
Módulo de Elasticidade	68,7 GPa
Calor Específico (0-100°C)	0,21 $cal/g^{\circ}C$
Coefficiente de expansão linear	24×10^{-6} L/°C
Condutividade térmica (0-25°C)	0,42 $cal/cm.s^{\circ}C$
Condutividade elétrica	40 (IACS)%

Antes de iniciar o processo de anodização, é necessário haver um preparo das amostras de modo a garantir que a peça não apresente defeitos em sua superfície. Deverá ser feito o uso de EPIs, como luvas e óculos de proteção, a fim de assegurar o usuário contra danos, e evitar a recontaminação da amostra.

O primeiro passo é realizar o lixamento e o polimento da peça. Serão usadas lixas #400, #600, #800, #1200 e #1500. Não houve polimento. Esse passo tem como objetivo nivelar a superfície do metal para que não haja defeitos durante a anodização.

Após o lixamento e polimento, é realizar a decapagem das gancheiras em solução de hidróxido de sódio (NaOH). Esse procedimento é responsável por retirar qualquer resquício de tinta, oxidações e impurezas sobre a superfície do metal.

Posteriormente, submete-se a peça à um banho de desengraxe, composto por solução alcalina de hidróxido de sódio e aditivo com poder tensoativo. Esse procedimento irá desengordurar a amostra.

O próximo passo é realizar a lavagem da peça por meio do jateamento de água potável corrente, de modo a eliminar os resquícios das soluções.

Por fim, é iniciado o processo de anodização, seguido da coloração e, por último, a selagem.

4.2 Processo de Anodização do Alumínio

A anodização é um processo eletrolítico parecido com o que ocorre em pilhas. Dessa forma, primeiramente é definido um sistema constituído por um eletrólito, uma área anódica e uma catódica. No primeiro, a solução utilizada é a encontrada em baterias automotivas, composta por água e ácido sulfúrico. A segunda é caracterizada pelo polo positivo da célula eletrolítica, onde será conectada a peça de alumínio a anodizar. E, a última é correspondente ao polo negativo, onde será conectada outra peça metálica, a qual não poderá ser feita de um composto que reaja com a solução. Todo esse sistema deverá estar ligado a uma fonte de corrente contínua de 12 V.

A partir do momento que a fonte é ligada, a corrente elétrica percorrerá o sistema a partir do cátodo para o ânodo, e começará a produção de alumina na peça de alumínio. Durante esse processo ocorrerá a liberação de gás oxigênio e hidrogênio, então deverá ser feito em um local arejado. Por se tratar de uma reação exotérmica, aconselha-se acoplar um sistema de refrigeração, de modo a manter o controle da temperatura desejada.

4.3 Parâmetros da Anodização

Para realizar o processo de anodização, alguns parâmetros devem ser definidos. De acordo com o Manual Técnico de Tratamentos de Superfícies, obtém-se a tabela 5, considerando um tratamento feito para peças caseiras.

Tabela 5 – Parâmetros para a Anodização.

Concentração H_2SO_4	100 a 180 g/L
Voltagem	12 a 18 V
Temperatura	18 a 24 °C
Densidade de Corrente	1,0 a 1,5 A/dm^2
Camada Pretendida	3 a 8 μm

4.3.1 Cálculo da Densidade de Corrente

A densidade de corrente é diretamente relacionada com a área de superfície. Dessa forma, a área de superfície é determinada pelas duas faces maiores e as quatro menores, demonstrada pela equação 4.1. O valor encontrado é $A_s = 2362 \text{ mm}^2$ ou $A_s = 0,2362 \text{ dm}^2$.

$$\begin{aligned}
 A_s &= 2 \cdot (B \times H) + 2 \cdot (B \times L) + 2 \cdot (H \times L) \\
 A_s &= 2 \cdot (20 \times 40) + 2 \cdot (20 \times 6,35) + 2 \cdot (40 \times 6,35) \\
 A_s &= 0,2362
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Ademais, é necessário calcular a massa molecular da alumina (Al_2O_3). Como demonstrado na equação 4.2, onde a massa molecular do alumínio é aproximadamente 27 u, e a do oxigênio, 16 u.

$$Al_2O_3 = (2 \times 27) + (3 \times 16) = 102u \tag{4.2}$$

O próximo passo é calcular o rendimento da reação na formação do óxido durante a anodização. Portanto, sabendo que a massa do alumínio, contido na equação 4.2, corresponde à $Al_2 = (2 \times 27) = 54 u$, tem-se o resultado na equação 4.3.

$$rendimento = \frac{Al_2O_3}{Al_2} = \frac{102u}{54u} = 1,89\%. \tag{4.3}$$

Como, durante a anodização, a formação da camada de óxido é proporcional à corrente aplicada, sabe-se que parte dessa película é dissolvida pela solução. Desse modo, ao considerar o coeficiente de dissolução da camada, com valor estabelecido por 0,32 pela literatura, tem-se a densidade média de corrente aproximada (DC), igual a $1,5 A/dm^2$, demonstrado na equação 4.4.

$$DC = 1,89 - 0,32 = 1,5A/dm^2 \tag{4.4}$$

Dessa forma, o passo final é considerar a equação 4.5 para o cálculo da corrente necessária a ser aplicada para anodizar uma superfície com a área definida. Substituindo os valores na equação 4.6, obtém-se uma corrente de 0,3543 A.

$$DC = \frac{Corrente}{A_s} \quad (4.5)$$

$$Corrente = DC \times A_s = 1,5 \times 0,2362 = 0,3543A \quad (4.6)$$

4.4 Ensaio de Rugosidade

Os ensaios de rugosidade foram realizados utilizando-se um rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-210, mostrado na figura 5. Foram realizadas seis medições para a amostra ainda lixada e mais seis medições para a amostra já anodizada. As medições foram realizadas no sentido longitudinal da amostra no comprimento de 40 mm. Foi utilizado como comprimento de amostragem (cut-off) de 0,8 mm.



Figura 5 – Rugosímetro utilizado para aferir dados sobre a rugosidade.

4.5 Ensaio de Microdureza

Os ensaios de microdureza Vickers foram realizados em um microdurômetro Shimadzu modelo HMV, mostrado na figura 6. A carga utilizada em cada indentação foi de 100 gf por um tempo de aplicação de 15 segundos. Foram realizadas dez indentações no sentido longitudinal da amostra, ao longo do comprimento de 40 mm. A distância entre cada indentação foi de 4,0 mm partindo da extremidade da amostra.



Figura 6 – Microdurômetro utilizado para aferir dados sobre a microdureza *Vickers*.

4.6 Ensaio de Morfologia

O objetivo deste ensaio foi caracterizar e comparar por meio de microscopia confocal a topografia da superfície da amostra estudada, lixada e posteriormente anodizada, com a utilização de um microscópio óptico Zeiss Axio Imager 2 acoplado a um sistema de varredura laser Zeiss LSM 700, equipado com laser de diodo (405 nm) e lente objetiva EC PLAN-NEOFLUAR 40x0,75. As imagens foram geradas a partir de mosaicos de 5 x 5 imagens totalizando uma área de varredura de 500x500 m. Para melhor visualização das imagens adquiridas por meio de microscopia confocal foi utilizado o software OmniSurf3D@.

4.7 Coloração

De modo a promover um caráter estético à peça, opta-se pela coloração. Para colorir a camada de óxido é necessário a uniformidade da superfície do material, obtida por meio do processo de anodização realizado. A porosidade resultante permite a fixação da cor no metal.

A coloração pode ser feita por meio de dois processos, por imersão em corantes orgânicos ou inorgânicos, ou pela eletrólise de sais de metais. Para este trabalho, será utilizado o método de imersão.

Este procedimento é o mais comumente utilizado em soluções caseiras. Porém, para aplicações industriais, recomenda-se o método por eletrólise, pois, pela coloração por imersão, os corantes utilizados não suportam a incidência constante de raios ultravioletas (UV) do Sol, ocasionando um desbotamento da peça.

Dessa forma, para o procedimento de imersão, basta preparar a solução com água e corante na concentração desejada. Com a solução pronta, será necessário o aquecimento desta e a imersão da peça. Com a agitação, mantém-se o corpo de prova até que a coloração

esteja completa. Com o aquecimento, há o fechamento dos poros e há a criação do alumínio anodizado colorido.

Neste trabalho foi utilizado corante líquido artificial alimentício, Verde Bandeira, marca Chef. O tempo de exposição da amostra foi de 30 minutos com temperatura de aproximadamente 40 °C.

4.7.1 Selagem

Para encerrar o processo de anodização, após a coloração, será feito o fechamento completo dos poros da camada de óxido formada. Essa película, agora constituída pela alumina, ao entrar em contato com a água, aumentará o seu volume e promoverá o fechamento dos poros entre os óxidos. Isso resultará em um filme impermeável e com uma alta resistência à corrosão.

Existem dois tipos de selagem, a quente e a frio. A diferença entre esses processos é a temperatura e a composição da solução.

A selagem a quente é a mais utilizada e podem ser usados aditivos para acelerar a reação, como o acetado de níquel. Baseia-se na reação da água com a alumina e resulta em um procedimento de boa qualidade. Porém, esse método apresenta desvantagens como a necessidade de manter a alta temperatura por tempo prolongado para finalização completa do tratamento.

Já a selagem a frio é realizada à temperatura ambiente com uma solução composta por sais de níquel e flúor, a qual irá reagir formando uma camada de alumínio-flúor-níquel de forma a acelerar a reação. Como resultado, será formada uma película de boemita, a qual oferecerá resistência à peça. Esse tratamento não necessita de energia para manter a água na temperatura desejada e é mais rápido se comparado com a quente.

Neste trabalho a selagem foi realizada a temperatura de aproximadamente 90 °C por uma hora.

4.8 Cronograma

Para a realização desse estudo, será seguido o cronograma representado pela tabela 6.

Tabela 6 – Cronograma para realização do estudo.

Atividade	De	Até
Revisão bibliográfica	01/02	22/05
Preparação das amostras	07/06	08/06
Anodização	14/06	15/06
Ensaio de Rugosidade	21/06	22/06
Ensaio de Microdureza	28/06	29/06
Ensaio de Morfologia	05/07	06/07
Coloração	12/07	13/07
Escrita dos resultados	19/07	04/11
Apresentação	05/11	15/11

5 Resultados

A seguir serão discutidos os resultados obtidos da caracterização superficial da amostra de alumínio anodizada, dos ensaios de rugosidade e dos ensaios de microdureza Vickers.

5.1 Caracterização Superficial

A figura 7 mostra a sequência de anodização da amostra de alumínio 6351 T6. Na sequência, (1) representa a amostra com textura lixada (lixa 1500), (2) indica a textura da amostra após a anodização e (3) a amostra após ser colorida por corante verde.

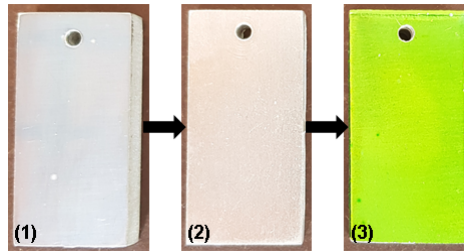


Figura 7 – Sequência de anodização da amostra de alumínio 6351 T6.

Em (2) é possível perceber a mudança de cor da amostra após a anodização, nesta etapa ocorre o aumento da camada de óxido natural do alumínio (Al_2O_3), formando um filme protetor que cresce a partir do metal base como uma parte adicional do metal. Em (3) a superfície da amostra foi colorida de verde com corante alimentício. A possibilidade de colorir a amostra de verde se deu em virtude da porosidade criada na superfície da amostra pelo eletrólito utilizado, neste experimento utilizou-se ácido sulfúrico (H_2SO_4). A presença de um filme poroso de Al_2O_3 tornou a superfície da amostra de alumínio 6351 T6 fortemente absorvente, conseqüentemente, apropriado para colorir. O H_2SO_4 gera um filme anódico incolor e transparente que pode ser facilmente colorido. A solução com H_2SO_4 produz um filme de óxido cuja espessura varia de $1,8 \mu m$ a $25 \mu m$ com estrutura permeável, garantindo uma excelente base para primers e tintas. (ARAÚJO J. V. S., 2021)

As figuras 8 e 9 mostram a caracterização superficial da amostra de alumínio 6351 T6, lixada e anodizada, respectivamente. A caracterização da amostra foi realizada por meio de microscopia confocal utilizando o software OmniSurf3D@.

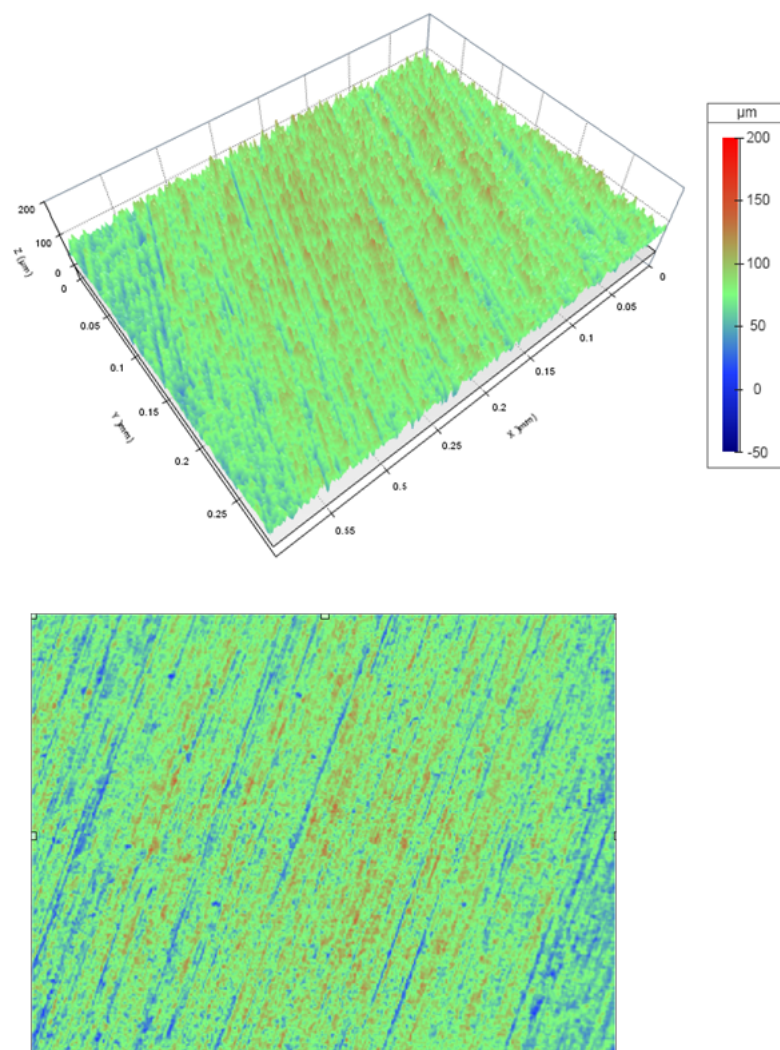


Figura 8 – Caracterização superficial da amostra de alumínio 6351 T6 lixada, antes da anodização.

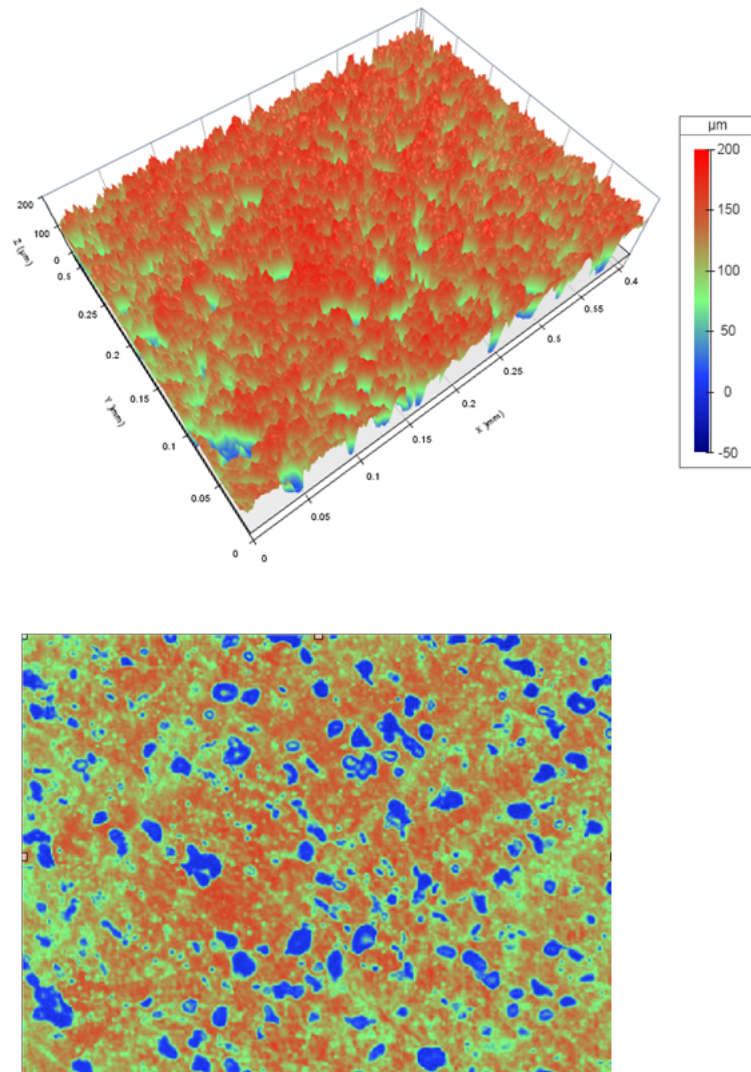


Figura 9 – Caracterização superficial da amostra de alumínio 6351 T6 lixada, depois da anodização

Na figura 8 observa-se uma superfície com textura uniforme, pela presença repetida de sulcos e picos originados pelo processo de lixamento, e distribuídos ao longo da superfície analisada. Já na Figura 9 observa-se que após a anodização da amostra de alumínio 6351 T6 a textura superficial tornou-se aleatória com a presença marcante de poros, mostrados na imagem pelos pontos azuis. Provavelmente esses poros foram formados devido à dissolução de elementos de liga presentes na amostra, os quais estão incrustados em sua superfície. Os elementos de liga são oxidados e removidos pelo eletrólito utilizado, H_2SO_4 , originando vazios na superfície da amostra.

5.2 Ensaio de Rugosidade

A Figura 10 mostra os resultados obtidos da medição da rugosidade média da amostra de alumínio 6351 T6 lixada e posteriormente anodizada. Os resultados mostram

uma maior rugosidade média da amostra após a anodização, fato que pode ser justificado pela elevada presença de vazios ou poros presentes na superfície anodizada, como pode ser observado na figura 9.

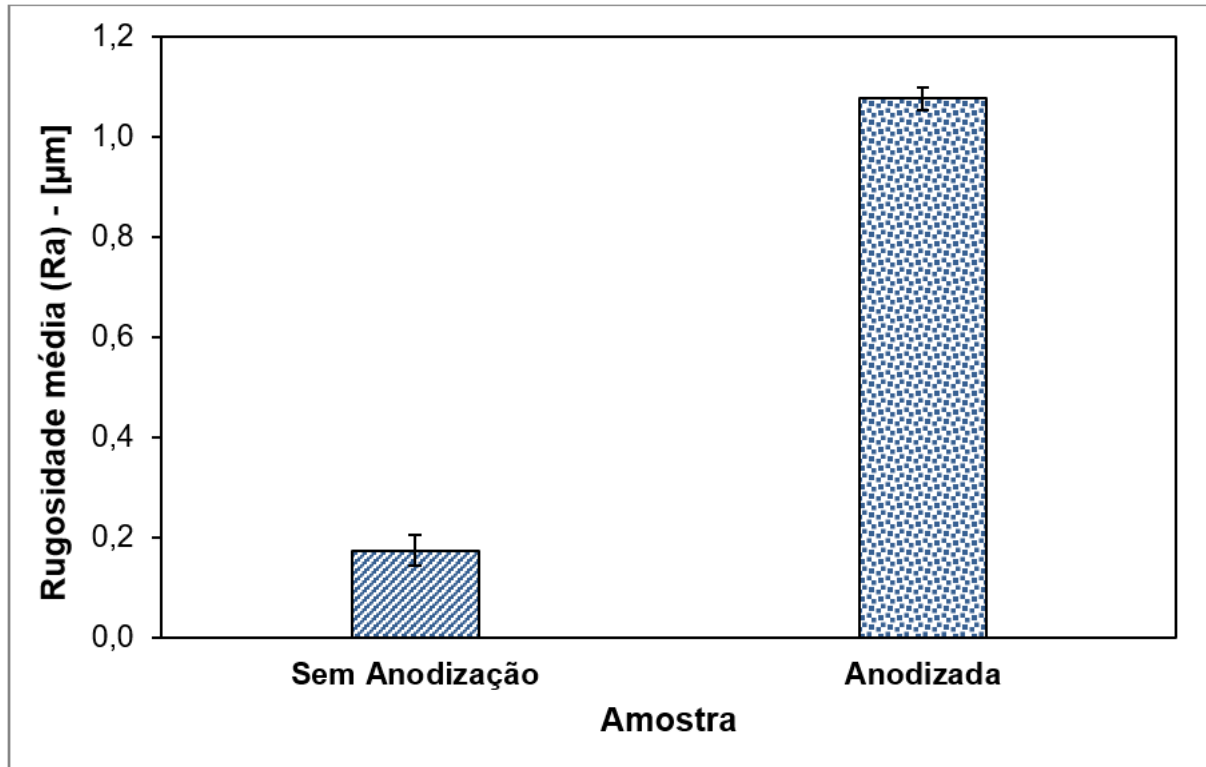


Figura 10 – Resultado dos ensaios de rugosidade média da amostra de alumínio 6351 T6.

5.3 Ensaio de Microdureza Vickers

A figura 11 mostra os resultados obtidos da medição da microdureza Vickers da amostra de alumínio 6351 T6 lixada e posteriormente anodizada. Estatisticamente os resultados mostram que não houve alteração da microdureza Vickers da amostra após a anodização da superfície. No entanto, este resultado pode ter sido mascarado pela leitura apenas do substrato da amostra. Possivelmente, a carga aplicada de 100 gf no ensaio foi muito elevada para a espessura do filme de Al_2O_3 formado, fazendo com que o penetrador atravessasse o filme obtendo a medida da microdureza do substrato. Provavelmente, o ideal para obtenção da microdureza do filme de Al_2O_3 seria utilizar a técnica de nanoindentação.

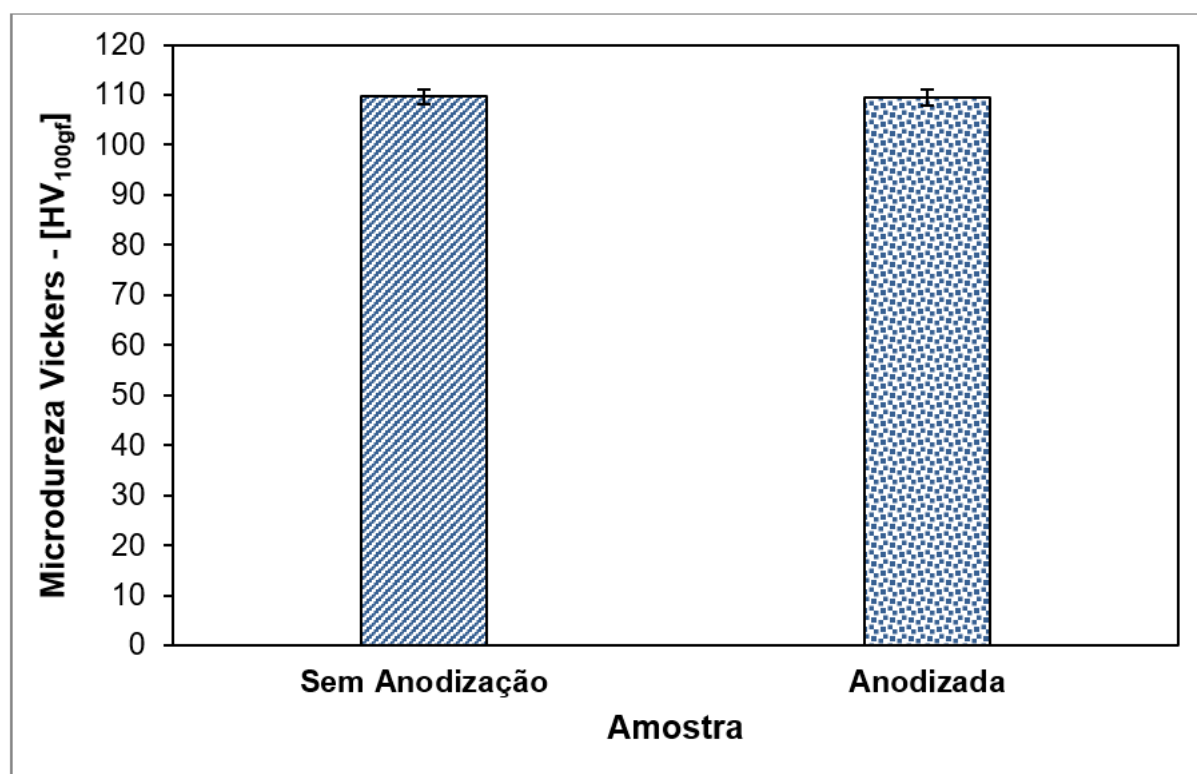


Figura 11 – Resultado dos ensaios de microdureza Vickers da amostra de alumínio 6351 T6.

6 Conclusão

Após a discussão dos resultados anteriormente obtidos, as seguintes conclusões podem ser consideradas a respeito do trabalho realizado:

- A liga de alumínio 6351 T6 juntamente com o eletrólito utilizado, H₂SO₄, mostraram-se adequados na anodização realizada;
- A anodização produziu uma textura aleatória na superfície da amostra de alumínio 6351 T6;
- A anodização provocou a formação de um filme poroso de Al_2O_3 na superfície da amostra de alumínio 6351 T6 permitindo a absorção do corante verde;
- A formação de um filme poroso de Al_2O_3 aumentou a rugosidade média da superfície da amostra de alumínio 6351 T6;
- A microdureza Vickers da amostra de alumínio 6351 T6 após a anodização não foi alterada.

Referências

- ALUMINIO 6351-T6. 2021. Acessado em 25/03/2021. Disponível em: <<https://www.ggdmetals.com.br/produto/aluminio-6351-t6/>>. Citado na página 22.
- ARAÚJO J. V. S., S. R. M. P. K. R. E. C. I. O processo de anodização do alumínio e suas ligas: Uma abordagem histórica e eletroquímica. *Química Nova*, 2021. Citado na página 29.
- CASTRO, R. D. S. E. D. Manual técnico - tratamento de superfícies. *Surtec*, 2012. Citado na página 12.
- DAVIS, J. *ASM Speciality Handbook: Aluminium and Aluminium Alloys*. [S.l.]: ASM International, 1993. Citado na página 10.
- DONG, H. *Surface Engineering of light alloys. Aluminium, magnesium and titanium alloys*. [S.l.]: CRC Press, 2010. Citado na página 12.
- GHALI, E. *Corrosion Resistance of Aluminum and Magnesium Alloys: Understanding, Performance, and Testing*. [S.l.]: John Wiley and Sons, 2010. Citado na página 13.
- INFORMACOES Técnicas Alumínio 6351. 2021. Acessado em 09/05/2021. Disponível em: <https://www.alumicopper.com.br/pdf/aluminio/info-tec-alumi_aluminio_6351.pdf>. Citado na página 16.
- MICROSCOPIA CONFOCAL BÁSICA. 2021. Acessado em 16/10/2021. Disponível em: <<chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fwww.ufjf.br%2Fpgcbio%2Ffiles%2F2018%2F10%2FApostila.pdf&clem=3982121>>. Citado na página 21.
- OLIVEIRA, L. C. de. Estudo do processo de anodizaÇÃo. *Dados Internacionais de Catalogação na Publicação. Universidade Federal do Ceará. Biblioteca Universitária.*, 2016. Citado na página 13.
- REDA M.; MAGD, G. A. E. Metal finishing. electrocoloring of anodized aluminum: Part ii—using mixed carboxylic acids. *Metal Finishing*, v. 95, 1997. Citado na página 14.
- SULKA, G. *Highly Ordered Anodic Porous Alumina Formation by Self-Organized Anodizing*. [S.l.]: WILEY-VCH, 2008. Citado na página 13.
- W.D., C. Ciência e engenharia dos materiais: Uma introdução. *LTC Editoras*, 2012. Citado na página 21.
- XU Y.; THOMPSON, G. E. W. G. C. Direct observation of the cell material comprising porous anodic films formed on aluminium. *Electrochimica Acta*, v. 27, 1982. Citado na página 13.