Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

CARACTERIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE DA LIGA DE ALUMÍNIO AA-5052 SUBMETIDA AO PROCESSO DE OXIDAÇÃO ELETROLÍTICA A PLASMA

Danilo Moreira Schiavon

Pindamonhangaba - SP
2024

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

CARACTERIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE DA LIGA DE ALUMÍNIO AA-5052 SUBMETIDA AO PROCESSO DE OXIDAÇÃO ELETROLÍTICA A PLASMA

Danilo Moreira Schiavon

Monografia apresentada à Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba para graduação no Curso Superior de Tecnologia em Mecânica – Processos de Soldagem

Orientador(a): Prof. Dr. Cristian Cley Paterniani Rita

Pindamonhangaba - SP
2024

S329c Schiavon, Danilo Moreira.
Caracterização da superfície da liga de alumínio AA-5052 submetida ao processo de oxidação eletrolítica a plasma / Danilo Moreira Schiavon / FATEC Pindamonhangaba, 2024.
43f.; il.

Orientador: Professor Dr. Cristian Cley Paterniani Rita
Monografia (Graduação) – FATEC – Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. 2024

1. Liga de alumínio AA5052. 2.Oxidação eletrolítica a Plasma. 3. Revestimento. 4. Caracterização superficial. I. Schiavon, Danilo Moreira. II. Rita, Cristian Cley Paterniani. III. Título.

CDD 669

Sueli Camargo de Souza – Bibliotecária FATEC Pindamonhangaba – CRB/8 7788

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

"CARACTERIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE DA LIGA DE ALUMÍNIO AA-5052 SUBMETIDA AO PROCESSO DE OXIDAÇÃO ELETROLÍTICA A PLASMA".

Danilo Moreira Schiavon

Monografia apresentada à Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba, para graduação no Curso Superior de Tecnologia em Mecânica: Processos de Soldagem.

Comissão Examinadora

Orientador – Prof. Dr. Cristian Cley Paterniani Rita

Membro – Prof. Dr. Jorge Luiz Rosa

Membro – Prof. Dr. José Rubens de Camargo

Pindamonhangaba, 10 de dezembro de 2024.

DEDICATÓRIA

A toda minha família e, especialmente, ao meu pai (Sr. Marcos Schiavon).

AGRADECIMENTO

Primeiramente, a toda minha família, em especial meus pais (Sra. Maria Elisabete Marciano Moreira e Sr. Marcos Schiavon) que sempre me apoiaram e me deram forças para que eu pudesse alcançar os meus objetivos.

Ao professor Dr. Cristian Cley Paterniani Rita, por orientar a realização do meu trabalho e por me dar a oportunidade de executar as minhas pesquisas no Laboratório de Plasma Eletrolítico.

SCHIAVON, D. M. **Caracterização da Superfície da Liga de Alumínio AA-5052 Submetida ao Processo de Oxidação Eletrolítica a Plasma**. 53p. Trabalho de Graduação (Curso de Tecnologia em Mecânica – Processos de Soldagem). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2024.

RESUMO

No mundo tecnológico, é de suma importância ter o conhecimento sobre as características comportamentais dos materiais, geralmente metálicos, quando submetidos a alguma determinada aplicação; visando a elaboração de processos que possam ajudar a minimizar e/ou neutralizar possíveis problemas que possam ocorrer durante a aplicação desses materiais, como por exemplo, a corrosão marítima. Portanto, a presente pesquisa foi proposta com o objetivo de estudar as alterações causadas na superfície da liga de alumínio AA-5052, aplicada na indústria naval, quando submetida ao processo de Oxidação Eletrolítica a Plasma (PEO) para o desenvolvimento de revestimentos ou tratamento de superfície. A proposta deste trabalho é estabelecer condições de ensaio que gere o revestimento com a melhor homogeneidade possível; e posteriormente analisar as modificações ocorridas na morfologia microestrutural e na composição química superficial destas amostras revestidas por meio do processo PEO; e a partir desta etapa compará-las com as características da superfície da amostra padrão sem revestimento. Para a realização dos procedimentos experimental da pesquisa, foram utilizadas as dependências dos laboratórios de Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba (Fatec-Pinda) e do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). Na FATEC, as amostras passaram, primeiramente, por etapas de preparo superficial (limpeza); realizado por processos de lixamento e banho ultrassônico; posteriormente, foram coletadas as informações iniciais de cada amostra, como as suas respectivas massa e microdureza, a fim de se comparar com os valores que seriam encontrados nas medições realizadas após a geração dos revestimentos; após essa etapa foram iniciados os ensaios, executados de acordo com parâmetros escolhidos pelos autores por meio da análise de pesquisa em trabalhos anteriores; após o desenvolvimento dos revestimentos, as amostras foram direcionadas aos ensaios de caracterização superficial, realizados por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Raio-x (EDS); por fim, as imagens coletadas foram comparadas e analisadas pelo autor, que concluiu que, embora tenham ocorridas alterações - na morfologia microestrutural, composição química e na microdureza da superfície das amostras revestidas, e alterações nas massas das amostras revestidas, nenhuma das condições de ensaios foi suficiente para geração de um revestimento de caráter homogêneo.

Palavras-chave: Liga de Alumínio AA-5052. Oxidação Eletrolítica a Plasma. Revestimento. Caracterização Superficial.

SCHIAVON, D. M. **Characterization of the Surface of AA-5052 Aluminum Alloy Subjected to the Plasma Electrolytic Oxidation Process**. 53p. Trabalho de Graduação (Curso de Tecnologia em Mecânica – Processos de Soldagem). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2024.

ABSTRACT

In the technological world, it is extremely important to have knowledge about the behavioral characteristics of materials, usually metallic, when subjected to a specific application; aiming at the development of processes that can help minimize and/or neutralize possible problems that may occur during the application of these materials, such as maritime corrosion. Therefore, this research was proposed with the objective of studying the changes caused on the surface of the aluminum alloy AA-5052, applied in the naval industry, when subjected to the Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) process for the development of coatings or surface treatment. The purpose of this work is to establish test conditions that generate the coating with the best possible homogeneity; and subsequently analyze the changes that occur in the microstructural morphology and surface chemical composition of these samples coated through the PEO process; and from this stage compare them with the surface characteristics of the standard sample without coating. To carry out the experimental procedures of the research, the facilities of the laboratories of the Pindamonhangaba Technology College (Fatec-Pinda) and the Technological Institute of Aeronautics (ITA) were used. At FATEC, the samples first underwent surface preparation (cleaning) stages, carried out by sanding and ultrasonic bath processes; subsequently, the initial information of each sample was collected, such as their respective mass and microhardness, in order to compare them with the values that would be found in the measurements carried out after the generation of the coatings; after this stage, the tests were started, performed according to parameters chosen by the authors through analysis of research in previous works; after the development of the coatings, the samples were directed to surface characterization tests, carried out by means of Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-ray (EDS); finally, the collected images were compared and analyzed by the author, who concluded that, although changes had occurred - in the microstructural morphology, chemical composition and microhardness of the surface of the coated samples, and changes in the masses of the coated samples, none of the test conditions were sufficient to generate a homogeneous coating.

Keywords: AA-5052 Aluminum Alloy. Plasma Electrolytic Oxidation. Coating. Superficial Characterization.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades do alumínio 5
Tabela 2 - Classificação das ligas de alumínio 6
Tabela 3 - Propriedades da alumina 7
Tabela 4 - Aplicação das ligas de alumínio 8
Tabela 5 - Composição química da liga AA-5052 8
Tabela 6 - Propriedades da liga AA-5052 9
Tabela 7 - Microdureza inicial das amostras da liga AA-5052 17
Tabela 8 - Massa inicial das amostras 18
Tabela 9 - Parâmetros do experimento 1(Amostra 2) 22
Tabela 10 - Parâmetros do experimento 2(Amostra 3) 23
Tabela 11 - Parâmetros do experimento 3(Amostra 4) 23
Tabela 12 - Características do experimento 1(Amostra 2) 23
Tabela 13 - Características do experimento 2(Amostra 3) 24
Tabela 14 - Características do experimento 3(Amostra 4) 25
Tabela 15 - Massa final das amostras 28
Tabela 16 - Comparação da composição química da Amostra 2 34
Tabela 17 - Comparação da composição química da Amostra 3 36
Tabela 18 - Comparação da composição química da Amostra 4 37
Tabela 19 - Microdureza final das amostras revestidas 39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Minério de Bauxita 4
Figura 2 - Composição física do alumínio 5
Figura 3 - Processo de eletrólise convencional 10
Figura 4 - Processo de PEO 11
Figura 5 - Amostras da liga AA-5052 13
Figura 6 - Furação das amostras da liga AA-5052 14
Figura 7 - Análise das amostras da liga AA-5052, pelo estereoscópio 14
Figura 8 - Superfície das amostras sem lixamento 15
Figura 9 - Lixadeiras manuais 15
Figura 10 - Superfície das amostras pós lixamento 16
Figura 11 - Ensaios de microdureza das amostras da liga AA-5052 17
Figura 12 - Pontos de medição da microdureza inicial das amostras da liga AA-5052 17
Figura 13 - Pesagem das amostras da liga AA-5052 18
Figura 14 - Banho ultrassônico das amostras da liga AA-5052 19
Figura 15 - Detergente neutro - limpeza fina das superfícies 19
Figura 16 - Pipeta volumétrica 20
Figura 17 - Preparo do eletrólito com glicerol 21
Figura 18 - Preparo do eletrólito com negro de fumo 21
Figura 19 - Equipamento do experimento 22
Figura 20 - Amostras de alumínio AA-5052 revestidas 27
Figura 21 - Analise de MEV da Amostra Sem Revestimento 28
Figura 22 - Analise de MEV da Amostra 2 29
Figura 23 - Analise de MEV da Amostra 3 30
Figura 24 - Analise de MEV da Amostra 4 31
Figura 25 - Ponto do Ensaio de EDS da Amostra Sem Revestimento 32
Figura 26 - Composição Química da Superfície da Amostra Sem Revestimento 32
Figura 27 - Ensaio de EDS da Amostra 2 33
Figura 28 - Composição Química da Superfície da Amostra 2 33
Figura 29 - Ponto do Ensaio de EDS da Amostra 3 34
Figura 30 - Composição Química da Superfície da Amostra 3 35
Figura 31 - Ponto do Ensaio de EDS da Amostra 4 36
Figura 32 - Composição Química da Superfície da Amostra 4 36
Figura 33 - Pontos de Medição da Microdureza Final das Amostras 39

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1

1.1 PROBLEMA 3
1.2 OBJETIVOS 3
1.2.1 Objetivo Geral 3
1.2.2 Objetivos Específicos 3
1.3 JUSTIFICATIVA 3

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 4

2.1 ALUMINIO E SUAS LIGAS 4
2.1.1 OBTENÇÃO DO ALUMÍNIO 4
2.1.2 PROPRIEDADES E CLASSIFICAÇÃO DO ALUMÍNIO E SUAS LIGAS 4
2.1.3 ÓXIDO DE ALUMÍNIO 7
2.1.4 APLICAÇÃO DO ALUMÍNIO E SUAS LIGAS 7
2.1.5 LIGA DE ALUMÍNIO AA-5052 8
2.3 ELETRÓLISE CONVENCIONAL 9
2.3.2 OXIDAÇÃO ELETROLÍTICA A PLASMA 10

3 MATERIAIS E MÉTODOS 13

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 27

4.1 COMPARAÇÃO VISUAL DAS AMOSTRAS 27
4.2 MASSA FINAL DAS AMOSTRAS 28
4.3 ENSAIOS DE MEV DAS AMOSTRAS 28
4.3.1 ENSAIO DE MEV DA AMOSTRA SEM REVESTIMENTO (AMOSTRA 1) 28
4.3.2 ENSAIO DE MEV DA AMOSTRA 2 29
4.3.3 ENSAIO DE MEV DA AMOSTRA 3 30
4.3.4 ENSAIO DE MEV DA AMOSTRA 4 31
4.4 ENSAIOS DE EDS DAS AMOSTRAS 32
4.4.1 ENSAIO DE EDS DA AMOSTRA SEM REVESTIMENTO (AMOSTRA 1) 32
4.4.2 ENSAIO DE EDS DA AMOSTRA 2 33
4.4.3 ENSAIO DE EDS DA AMOSTRA 3 34
4.4.4 ENSAIO DE EDS DA AMOSTRA 4 36
4.4.5 COMPARAÇÃO GERAL DOS ENSAIOS 37
4.4 MICRODUREZA FINAL DAS AMOSTRAS 39

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 40

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS 41

1 INTRODUÇÃO

No mundo tecnológico é de suma importância a necessidade de se ter o conhecimento sobre as propriedades dos materiais, sejam elas mecânicas, físicas ou químicas, para se obter o sucesso desejado na aplicação de algum determinado equipamento. (PAVANATI, 2010)

O alumínio é o material metálico mais abundante na crosta terrestre, extraído da natureza por meio do minério da bauxita, que possui cerca de 35 a 45% de teor de massa de óxido de alumínio - Al_2O_3. Comumente, é conhecido por ser um material metálico caracterizado por apresentar boas propriedades em termos leveza, ductilidade e principalmente resistência a corrosão, portanto, esse material é vastamente aplicado na fabricação de diferentes equipamentos, desde pequenos utensílios domésticos até grandes estruturas navais. Entretanto, vale ressaltar que em seu estado puro o alumínio possui uma certa limitação em termos de aplicação devido a sua baixa resistência mecânica, no entanto, é comum a fabricação de equipamentos utilizando as ligas de alumínio. (MUI, 2016)

As ligas de alumínio são materiais que não apresentam somente o alumínio em sua composição química, mas também, podem apresentar materiais como cobre, manganês, silício, zinco, entre outros, na qual são chamados de elementos de liga; a presença desses materiais ligados ao alumínio vem da necessidade de se obter propriedades específicas para o mesmo, impactando principalmente a resistência mecânica do material. A classificação e identificação das ligas de alumínio acontece por meio do regulamento de normas técnicas, como, por exemplo, a norma AA, que visa classificar as ligas de alumínio conforme a porcentagem de elemento de liga presente. (OLIVEIRA, 2017)

Dentre as diversas ligas de alumínio existentes, temos a liga AA 5052, que é vastamente aplicada na fabricação de equipamentos utilizados na indústria naval, por ser um material que apresenta boa resistência a corrosão em ambientes marítimos. (CORTINHAS, 2019)

Entretanto, além da inserção dos elementos de liga no alumínio, também existem outros métodos para a melhoria das propriedades do material, como por exemplo as exposição do alumínio e suas ligas aos processos de tratamentos superficiais, que buscam alterar, somente, as propriedades superficiais do material, impactando principalmente com a resistência a corrosão. (RODRIGUES, 2015)

Entre os principais processos de tratamentos superficiais que existem, encontra-se a eletrólise, que convencionalmente baseia-se na imersão de dois eletrodos em um banho eletrolítico, onde há uma peça metálica fixada a um eletrodo conectado ao polo positivo de uma fonte de corrente elétrica, nomeado de ânodo, e o outro eletrodo conectado ao polo negativo, chamado de catodo; a partir do momento em que o circuito é fechado, os elétrons da peça metálica fixada no anodo são retirados, permitindo que os íons formados reajam com a água, gerando uma camada de óxido sobre o metal. (SILVA, 2022)

No entanto, além do processo de eletrólise convencional, também temos o processo de Oxidação Eletrolítica a Plasma (PEO), na qual funciona de maneira similar ao processo de eletrólise convencional, porém, para esse processo utiliza-se uma aplicação de tensão muito maior, que geram descargas de plasma na superfície do metal, promovendo a geração do revestimento. Portanto, o PEO quando comparado ao processo de anodização convencional, se torna mais vantajoso em termos de tempo de execução do processo. (YEROKHIN, 1999)

Entretanto, visando executar o PEO sobre a liga de alumínio AA 5052, o presente trabalho foi proposto, com o intuito de se estudar a camada de óxido gerada no metal, por meio da execução de ensaios de análise de superfície.

1.1 PROBLEMA

Quais serão as alterações na superfície da liga de alumínio AA 5052 submetida ao PEO? Conseguiremos definir quais são os parâmetros ideais para a obtenção do melhor revestimento possível?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Estudar os revestimentos obtidos por PEO na superfície da liga de alumínio AA 5052.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estudar e comparar as condições de execução do PEO, observando a influência do tempo de deposição, da corrente aplicada e da concentração dos solutos propostos para a formação da camada formada;
- Determinar qual é a condição de ensaio ideal para a geração de um revestimento com a melhor característica de homogeneidade.
- Caracterizar a superfície obtida através do PEO por meio da análise da microestrutura e da composição química, com o auxílio de ensaios de Microscopia Eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de Raios-X (EDS).

1.3 JUSTIFICATIVA

O estudo das alterações causadas na superfície da liga de alumínio AA-5052 submetida ao processo PEO, é muito importante na área tecnológica, visando entender e aprender as características superficiais que serão obtidas com a geração dos revestimentos; visto que a liga AA-5052 é muito aplicada na indústria naval, onde são encontrados muitos problemas decorrentes da corrosão do ambiente marítimo, localizada nas superfícies dos equipamentos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ALUMINIO E SUAS LIGAS

2.1.1 Obtenção do Alumínio

O alumínio é um material metálico naturalmente encontrado em forma de óxido - Al_2O_3. A sua obtenção pode acontecer por meio de dois processos – primário ou secundário. O processo primário baseia-se na obtenção do alumínio na natureza, na qual se dá pela extração do minério da bauxita, representado pela figura 1, que possui cerca de 35 a 45% de teor de massa de óxido de alumínio - Al_2O_3. Já no processo secundário, a obtenção do alumínio acontece por meio da reciclagem, onde o alumínio é extraído por meio do processamento de sucatas, como, por exemplo, latas de refrigerante, equipamentos automotivos, equipamentos aeronáuticos, entre outros. (MUI, 2016)

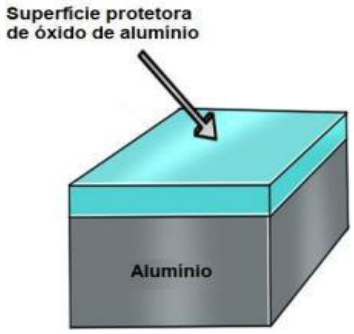
Figura 1 - Minério de Bauxita

Fonte: Kate (2018)

2.1.2 Propriedades e Classificação do Alumínio e Suas Ligas

Naturalmente, o alumínio possui uma densidade de 2,7g/ml e é caracterizado por ser um material com baixa resistência mecânica e extremamente leve, visto que também é conhecido pela a sua alta resistência a corrosão, devido à presença de uma camada de óxido em sua superfície, como representado pela figura 2. (REIS, 2009)

Figura 2 - Composição física do alumínio



Fonte: Adaptado OpenLearn (2018).

Entretanto, em seu estado puro, o alumínio possui uma certa limitação em termos de aplicação industrial. Algumas propriedades do alumínio puro estão representadas pela tabela 1. (SOUZA, 2013)

Tabela 1 - Propriedades do alumínio

Número atômico	13
Massa específica teórica	2698 Kg/m^3
Temperatura de ebulição	1979 – 2477 ºC
Temperatura de fusão	660 ºC
Calor específico	4000 J/Kg.K (25ºC)
Calor latente de fusão	397 Kj/Kg
Condutibilidade térmica	247 W/m.K (25ºC)
Resistividade elétrica	26,55 nΩ.m (20ºC)
Condutibilidade elétrica	64,94 %IACS
Estrutura cristalina	c.f.c

Fonte: Adaptado Camargo (2007)

No entanto, é bastante comum a produção de equipamentos utilizando ligas de alumínio. Essas ligas são compostas não apenas por alumínio, mas também por outros elementos que são adicionados ao metal por meio de processos industriais, conhecidos como elementos de liga. Entre os principais elementos de liga, destacam-se o zinco, o cobre, o silício, o magnésio e o manganês. A combinação desses elementos, associada a tratamentos térmicos, permite a melhoria das propriedades do alumínio, ampliando suas aplicações na indústria e atendendo melhor às demandas específicas de diversos setores. (OLIVEIRA, 2017)

Portanto, para se obter o controle de quais elementos estão presentes em uma determinada liga, as mesmas são devidamente identificadas por normas técnicas; no

caso do alumínio, temos como exemplo a norma AA (Aluminum Association), que visa a classificação das ligas de alumínio em séries, de acordo com o elemento de liga majoritário presente, conforme representado pela tabela 2. (OLIVEIRA, 2017)

Tabela 2 - Classificação das ligas de alumínio

Série	Elementos de liga principais
1XXX	Alumínio Puro
2XXX	Cu
3XXX	Mn
4XXX	Si
5XXX	Mg
6XXX	Mg, Si
7XXX	Zn
8XXX	Sn, Li, Fe, Cu, Mg
9XXX	Reservado para uso futuro

Fonte: Gonçalves (2012)

Como demonstrado pela tabela acima, a norma AA estabelece 4 dígitos para a representatividade das ligas de alumínio, sendo que cada digito possui uma função de representação. Nas ligas da série 1XXX, os dois últimos dígitos referem-se ao grau de pureza do alumínio; já nas outras séries é adotado o seguinte regulamento:

- **1º digito** = indica o elemento majoritário da liga;
- **2º digito** = se for "0" indica que é uma liga normal; se for "1", "2" ou "3" indica uma variedade especifica da liga normal (como o teor mínimo ou máximo de um determinado elemento);
- **3° e 4º digito** = são para diferenciar as várias ligas da série. (OLIVEIRA, 2014, p. 23)

Além do aprimoramento das propriedades do alumínio através da adição de elementos de liga, é importante destacar os processos de tratamento superficial, que têm como objetivo formar uma camada protetora na superfície do metal. Esses tratamentos são fundamentais para aumentar a resistência à corrosão do material. (RODRIGUES, 2015)

2.1.3 Óxido de Alumínio

O óxido de alumínio, conhecido como alumina (Al_2O_3), é um material de caráter cerâmico, encontrado no minério da bauxita, muito utilizado na indústria, principalmente, pelo seu baixo custo de fabricação. Em termos de propriedades, a alumina destaca-se por apresentar uma alta dureza, podendo ser o material mais resistente e rígido da família dos óxidos cerâmicos, dependendo da fase em que se encontra e da morfologia atômica presente. Algumas propriedades da alumina estão representadas pela tabela 3. (NICOLITE, 2017)

Tabela 3 - Propriedades da alumina

Propriedades	Faixa
Densidade relativa (g/cm^3)	3,4 – 4,0
Coeficiente de expansão térmica ($x10^{-6}$ $ºC^{-1}$)	7,5 – 8,5
Resistência à compressão (MPa)	1000 – 2800
Resistência à tração (MPa)	140 – 170
Resistência à flexão (MPa)	280 – 420
Tenacidade à fratura ($MPa.m^{1/2}$)	3,0 - 4,0
Módulo de elasticidade (Gpa)	350 – 400
Módulo de cisalhamento (Gpa)	140 -160
Microdureza ($Kg.mm^{-2}$)	1400 - 1800

Fonte: Adaptado Campos (2018).

A alumina possui diferentes funções de aplicação no ramo industrial, dentre elas pode-se destacar a sua utilização para fins de preparo da superfície de amostras de outros metais, para passarem por inspeção metalográfica; pois, a sua alta dureza torna a alumina um excelente material para polimento superficial. (CARVALHO, 2024)

2.1.4 Aplicação do Alumínio e Suas Ligas

O alumínio e suas ligas possuem um amplo campo de aplicação, na qual varia desde pequenos utensílios domésticos até grandes estruturas navais. O motivo pelo qual o campo de aplicação do alumínio seja tão vasto, se dá principalmente pela diversidade de ligas de alumínio existentes, que possuem diferentes propriedades umas das outras. A aplicação das ligas de alumínio varia conforme a composição química que as mesmas apresentam, sendo muito bem empregadas entre os diferentes campos da indústria, conforme representado pela tabela 4. (MUI, 2016)

Tabela 4 - Aplicação das ligas de alumínio

Designação de série	Principais aplicações
1XXX	- Indústrias químicas e alimentícias - Peças e equipamentos elétricos - Revestimentos, tipo Alclads
2XXX	- Indústria aeronáutica
3XXX	- Indústria de transporte terrestre (Carroceria de carros, caminhões, ônibus e trens) - Uso em geral (latas, placas e utensílios)
4XXX	- Varetas e eletrodos de soldagem
5XXX	- Indústria de transporte terrestre e marítimo (Elementos estruturais e veículos em geral)
6XXX	- Indústria de transporte em geral - Uso arquitetônico
7XXX	- Indústria aeronáutica e militar
8XXX	- Estruturas que demandam elevado carregamento - Indústria aeronáutica
9XXX	Reservada para usos futuros

Fonte: Adaptado Mui (2016)

2.1.5 LIGA DE ALUMÍNIO AA-5052

Pertencente a séria 5XXX, a liga de alumínio AA-5052 é um material caracterizado, principalmente, pela sua alta resistência mecânica e a sua boa imunidade contra a ação de agentes corrosivos em todos os meios atmosféricos. Portanto, essa liga de alumínio é vastamente aplicada na fabricação de equipamentos direcionados, principalmente, a indústria naval, como por exemplo os cascos de navios. As boas propriedades apresentadas por essa liga estão diretamente relacionadas a composição química do material, que por sua vez, possui o Magnésio (Mg) como material majoritário ligado ao alumínio, o que é característico das ligas pertencentes a série 5XXX. A composição química da liga AA-5052 está representada pela tabela 5. (CORTINHAS, 2019)

Tabela 5 - Composição química da liga AA-5052

Al	Mg	Mn	Fe	Si	Cr	Zn	Cu
96 – 97%	2,2 – 2,8%	0,10%	0,40%	0,25%	0,15% - 0,35%	0,10%	0,10%

Fonte: Mechanical (2016)

Outra vantagem da liga AA-5052 é a sua leveza, que quando proporcionada a sua resistência, torna o material ainda mais agradável para uma determinada aplicação. Algumas propriedades da liga de alumínio AA-5052 estão

representadas pela tabela 6. A boa resistência mecânica da liga AA-5052 é obtida através de trabalho a frio, como o refinamento de grãos recristalizados por meio de laminação a frio, seguido de tratamento térmico de recozimento. (ADMIN, 2021)

Tabela 6 - Propriedades da liga AA-5052

Propriedades mecânicas	Min – Max
Densidade	2680 Kg/m^3
Ponto de fusão	650 ºC
Módulo de elasticidade	69,3 GPa
Resistividade elétrica	0.050x10^{-6} Ωm
Condutibilidade térmica	138 W/mK
Expansão térmica	23,75x10^{-6} m/k

Fonte: Mechanical (2016)

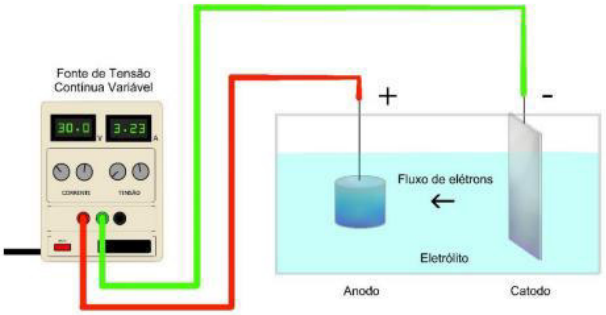
2.3 ELETRÓLISE CONVENCIONAL

A eletrólise é um processo eletroquímico, não espontâneo, provocado por corrente elétrica, na qual baseia-se em alterar as características superficiais de materiais, geralmente metálicos. Por meio da formação de uma camada de óxido sobre a superfície dos materiais, a eletrólise tem como objetivo proporcionar características superficiais que os tornam aptos para determinada aplicação; impactando principalmente em propriedades superficiais como: resistência a corrosão, condutividade elétrica, condutividade térmica, entre outros. Entre as principais áreas da indústria que utilizam o processo de eletrólise, destaca-se a indústria do alumínio, para fins estéticos e/ou de combate contra a atuação de agentes corrosivos. (STOODI, 2020)

De acordo com a figura 3, durante a eletrólise, o metal é fixado a um eletrodo, nomeado de ânodo, conectado ao polo positivo de uma fonte de corrente elétrica, onde são controlados os parâmetros de energia; este material é submergido em uma solução eletrolítica (eletrólito) com boa condutividade iônica, junto com outro material que estará fixado a outro eletrodo, conectado ao polo negativo da fonte, chamado de cátodo, podendo ser uma barra de carbono, níquel, chumbo, aço inoxidável, ou qualquer outro material condutor que não reagirá com o banho. A partir do momento em que a corrente elétrica passa pela solução, há a liberação do hidrogênio do cátodo

e os elétrons são liberados do metal do ânodo, permitindo que os íons se formem e reajam com a solução, resultando na formação de uma camada de óxido sobre a superfície do metal. Essa camada não apenas protege o metal contra a corrosão e oxidação, mas também pode ser pigmentada, oferecendo uma variedade de acabamentos estéticos. (NETO; MOREIRA, 2007)

Figura 3 - Processo de eletrólise convencional



Fonte: Adaptado RENZ (2015)

No processo de eletrólise, as características da camada de óxido a ser formada na superfície do metal, depende e varia diretamente de acordo com os parâmetros que são selecionados para a execução do processo; como por exemplo: corrente, tensão, tempo, temperatura, distância entre os eletrodos, entre outros. Existe também a interferência causada por meio da solução eletrolítica utilizada no processo, visto que a mesma, pode ser de caráter neutro ou ácido, impactando na morfologia microestrutural da superfície do metal. (NETO; MOREIRA, 2007)

Atualmente, a eletrólise pode ser aplicada e subdividida em diversos processos, de acordo com a finalidade do revestimento a ser formado, e em relação aos parâmetros utilizados no processo e ao material a ser revestido. Sobre os principais processos que utilizam a eletrólise, podem ser citados a anodização e o processo de oxidação eletrolítica a plasma. (AROEIRA)

2.3.2 Oxidação Eletrolítica a Plasma

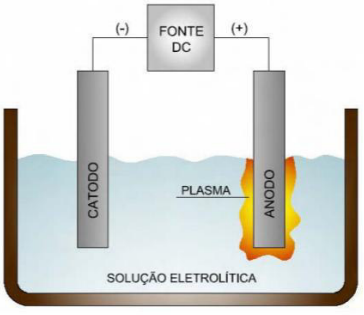
O processo de Oxidação Eletrolítica a Plasma (PEO), também conhecido como eletrólise a plasma e/ou Oxidação por Micro Arcos (MA), é um processo eletroquímico, com características de funcionalidade similares ao processo de eletrólise convencional, associado aos fenômenos de plasma à pressão

atmosférica. (MACHINING, 2023)

Os primeiros estudos em relação aos fenômenos de descargas elétricas associados ao processo de eletrólise foram iniciados no século XIX, porém em 1970 a técnica foi aperfeiçoada, sendo conhecida como Oxidação por Micro Arcos. Por ser um processo relativamente novo quando comparado ao processo de eletrólise convencional, o PEO ainda possui certas limitações em termos de aplicação industrial; porém, os campos de desenvolvimento tecnológico que estudam e aplicam o processo de PEO, buscam solucionar problemas que ocorrem nas superfícies dos materiais, como por exemplo a corrosão marítima. (LIMA, 2020)

Como citado anteriormente, o PEO também se baseia na geração de uma camada de óxido sobre a superfície de materiais, como o nióbio, o titânio e o alumínio, por meio da submersão dos mesmos em um meio eletrólito (solução eletrolítica), conforme representado pela figura 4, onde o metal a ser revestido é fixado no ânodo (eletrodo conectado ao polo positivo da fonte de energia), que está paralelo ao catodo (eletrodo conectado ao polo negativo da fonte de energia), conectados a uma fonte de energia com potencial muito maior do que a utilizada no processo de anodização convencional, podendo chegar a 1000V. Portanto, quando atribuída uma alta tensão ao processo, provoca-se a formação de um plasma na interface entre o ânodo e a solução eletrolítica, resultando em micro descargas elétricas que oxidam a superfície do material, podendo chegar a aproximadamente 20000ºC, dependendo das estruturas de descargas. Vale ressaltar que, o processo de PEO pode ser realizado tanto em configuração anódica quanto catódica, sob pressão atmosférica. (YEROKHIN, 1999)

Figura 4 - Processo de PEO



Fonte: OLIVEIRA (2010)

Os revestimentos gerados a partir do processo de PEO, são cerâmicos porosos e densos, na qual costumam apresentar boa adesão a superfície do substrato. Geralmente, são compostos por uma camada exterior de perfil poroso e uma camada interior compacta na qual a composição química e a espessura estão relacionadas ao tipo de solução eletrolítica utilizada no processo. (MACHINING, 2023)

O PEO é dividido em duas etapas: ionização e condensação. Na primeira etapa, um campo elétrico intenso provoca a ionização do material, que pode ocorrer de forma térmica ou por impacto na região de descarga, resultando em reações exotérmicas. O campo elétrico separa as partículas carregadas presentes no plasma. Na segunda etapa, a temperatura diminui rapidamente e os compostos se condensam dentro das descargas. Devido ao rápido resfriamento, sólidos fora do equilíbrio podem se formar em temperatura ambiente. A composição dessa fase determina as propriedades mecânicas e tribológicas da superfície. (LIMA, 2020)

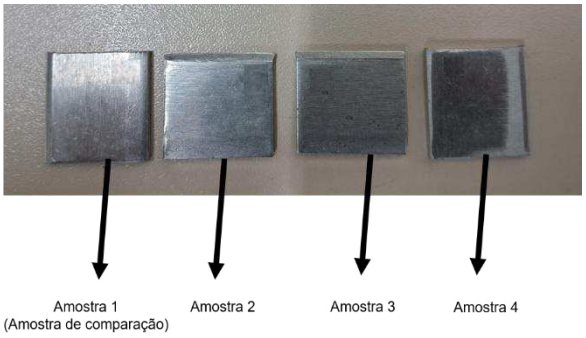
Assim como a eletrólise convencional, as características físicas do revestimento obtido no pelo processo de PEO, está diretamente proporcionada aos parâmetros atribuídos para a realização dos ensaios, especialmente, os valores de tensão e a densidade da corrente elétrica. No entanto, diferencia-se pelo fato que o processo de PEO utilizar uma tensão muito mais elevada do que o processo de eletrólise convencional, tornando esse processo mais vantajoso em termos de tempo de ensaio; visto que, a realização de um processo de eletrólise convencional dura em média de duas a três horas, e o processo de PEO pode ser realizado em média de 20 a 30 minutos. (LIMA, 2020)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram preparadas 4 amostras, representadas pela figura 5, de uma liga de alumínio AA-5052, no formato quadrado, com dimensões de 30mm X 30mm X 2mm. Com o intuito de identificá-las, as amostras foram nomeadas da seguinte maneira: Amostra 1, Amostra 2, Amostra 3 e Amostra 4.

Deste lote de amostras apresentadas, a Amostra 1 foi utilizada como referência, ou seja, um padrão que não sofreu o processo de tratamento de superfície através do PEO, para efeito comparativo.

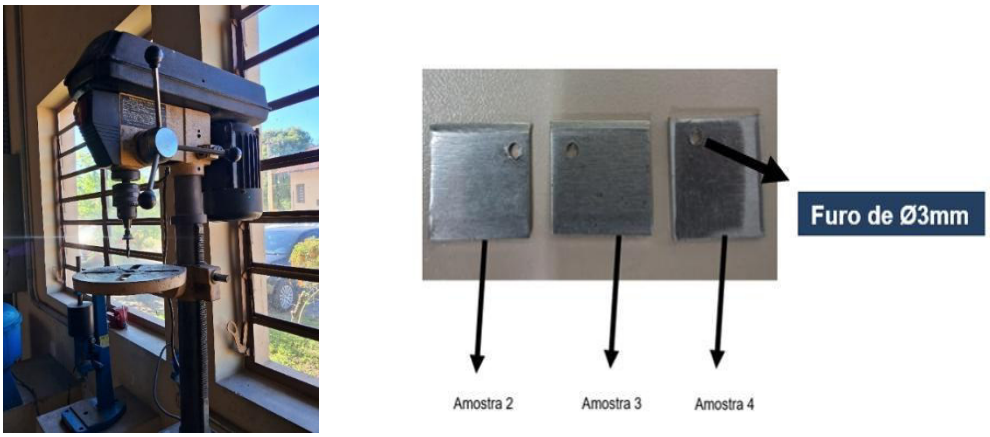
Figura 5 - Amostras da liga AA-5052



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Todas as amostras passaram pelo mesmo processo de preparação antes de serem submetidas ao PEO. Na fase 1, as amostras foram cortadas em uma guilhotina localizada no laboratório de usinagem da Fatec – Pindamonhangaba. Após os cortes as amostras 2, 3 e 4 foram furadas em uma furadeira de bancada vertical (Marca: Ferrari; Modelo: FGC-16; Mandril: 5/8”; Motor: 1/2Cv Bivolt; 5 velocidades: 570 a 3050r.p.m.), com uma broca de Ø3mm, nas regiões laterais superiores, assim como representado pela figura 6; este furo foi utilizado como ponto de fixação de cada amostra ao porta amostras.

Figura 6 - Furação das amostras da liga AA-5052



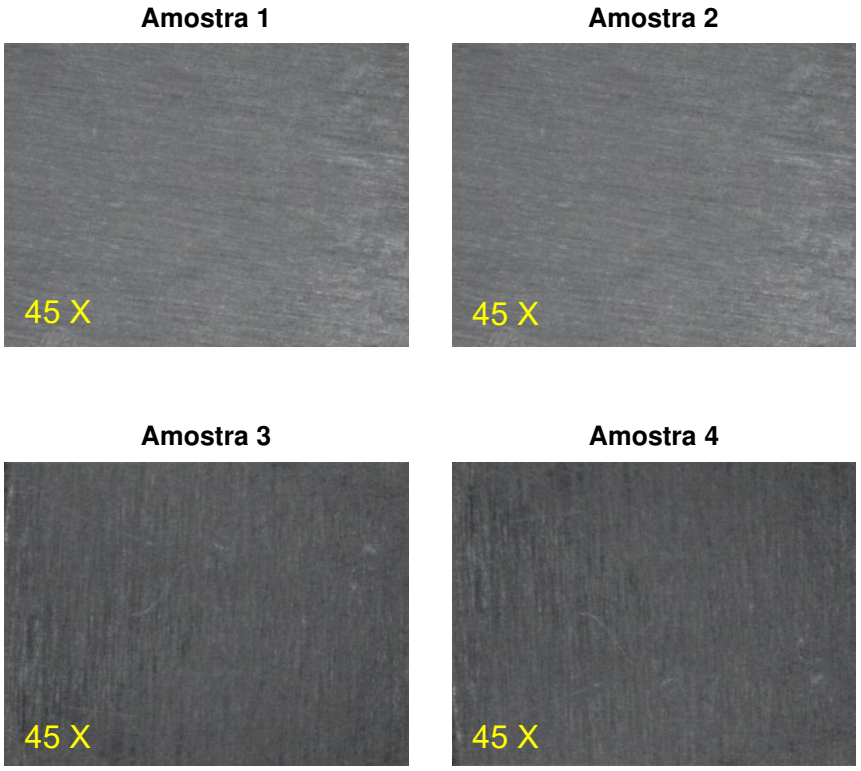
Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Após a execução dos furos, iniciou a 2ª Fase: Procedimento de limpeza e preparo da superfície das amostras. Como critério de controle desta fase, foi estabelecido para todas as amostras antes do preparo superficial, a análise da superfície através de um estereoscópio (Marca: Olympus, Modelo: SZ2 – ET, Capacidade: 6.7x a 45x) representado na figura 7, onde optou-se por uma ampliação de 45x, com a finalidade de capturar imagens da superfície das amostras antes de iniciar o processo de limpeza. As imagens capturadas estão representadas pela figura 8.

Figura 7 - Análise das amostras da liga AA-5052, pelo estereoscópio

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Figura 8 - Superfície das amostras sem lixamento



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

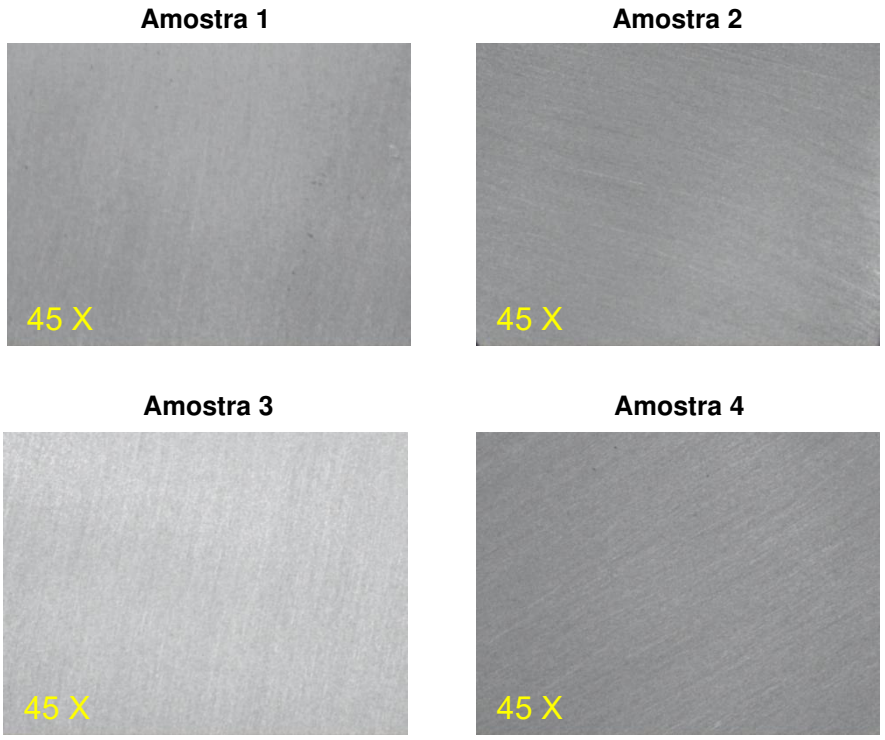
Após a captura das imagens, as amostras foram submetidas ao processo de lixamento e, foram utilizadas duas lixadeiras manuais, representadas na figura 9, onde utilizou-se lixas na seguinte escala granulométrica: 180, 220, 360, 400, 500, 1200 mesh. Para estabelecer o controle durante o processo de lixamento, antes de uma amostra passar de uma lixa para outra, era realizada uma análise da superfície da mostra no estereoscópio, com o objetivo de certificar-se que todos os riscos estavam alinhados na mesma direção, pois para a realização do processo de lixamento, adotou-se o padrão de rotacionar as amostras em ângulos de 90º quando uma amostra passar de uma lixa para outra, para que os riscos da lixa anterior fossem substituídos.

Figura 9 - Lixadeiras manuais

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Para análise do processo de lixamento no estereoscópio, todas as amostras passavam antes por um processo de limpeza das superfícies lixadas, realizado com álcool etílico 99,5% e um secador de superfície. Após o processo de lixamento e análise das superfícies, foram capturadas as imagens da superfície, com o auxílio do estereoscópio, na ampliação de 45X, imagens representadas pela figura 10.

Figura 10 - Superfície das amostras pós lixamento



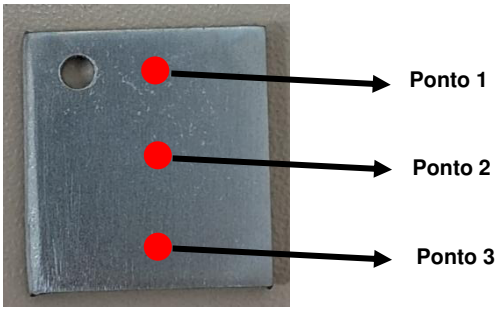
Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Após o término do processo de lixamento, as amostras foram submetidas ao teste de microdureza. Para a realização do teste de microdureza das amostras, foi utilizado um microdurômetro (Marca: Mitutoyo, Capacidade de carga em kgf: 0,01, 0,025, 0,05, 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, 1,0) representado na figura 11, onde utilizou-se uma carga de 1kgf e efetuou-se a leitura na escala Hardness Vickers (HV) em 3 diferentes pontos das amostras, representados na figura 12. Os resultados obtidos estão representados na tabela 7.

Figura 11 - Ensaios de microdureza das amostras da liga AA-5052

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Figura 12 - Pontos de medição da microdureza inicial das amostras da liga AA-5052



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Tabela 7 - Microdureza inicial das amostras da liga AA-5052

Amostra	1	2	3	4
Ponto 1	81.7 HV	88.8 HV	71.8 HV	97.8 HV
Ponto 2	83.8 HV	84.5 HV	80.4 HV	93.5 HV
Ponto 3	81.3 HV	88.0 HV	87.7 HV	95.8 HV
Média	79.96 HV	87.1HV	82.26 HV	97.5 HV

Fonte: elaborado pelo autor

Após a realização da medição da microdureza das amostras, foi realizado o processo de pesagem das mesmas. Para realizar a pesagem das amostras, foi utilizada uma balança (Marca: Shimadzu, Modelo: AY 220, Capacidade: 0,01g a 220g) representada na figura 13, onde cada amostra foi posicionada 5 vezes com o intuito de se obter uma média. Os valores das massas registradas estão representados na tabela 8.

Figura 13 - Pesagem das amostras da liga AA-5052

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

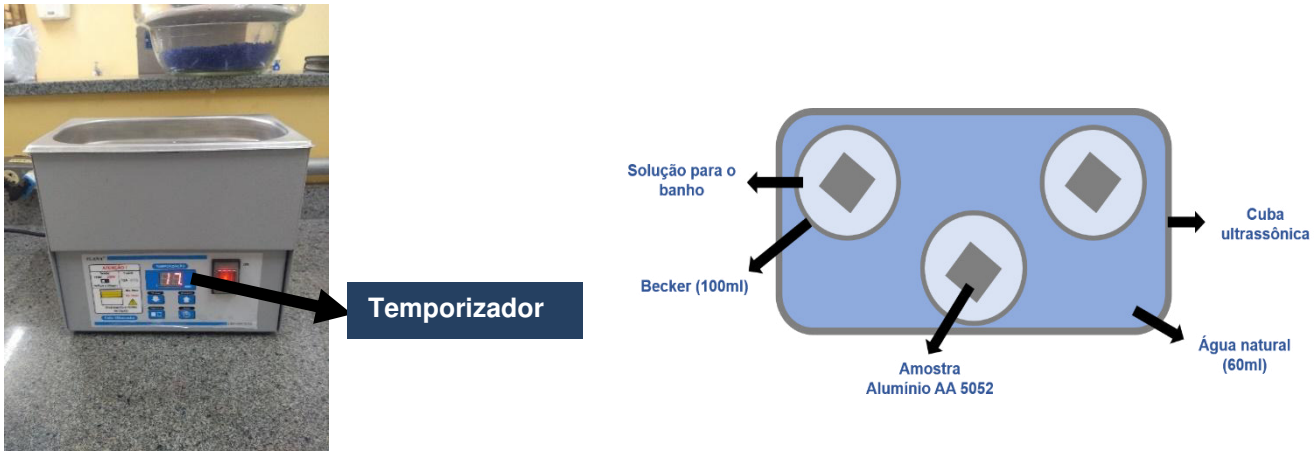
Tabela 8 - Massa inicial das amostras

Amostra	1	2	3	4
1º pesagem	1.7108g	1.7101g	1.6447g	1.6553g
2º pesagem	1.7111g	1.7099g	1.6448g	1.6552g
3º pesagem	1.7109g	1.7101g	1.6444g	1.6551g
4º Pesagem	1.7112g	1.7099g	1.6447g	1.6552g
5º Pesagem	1.7108	1.7100g	1.6444g	1.6550g
Média	1,7109g	1,7100g	1.644,6g	1.6551,6g

Fonte: elaborado pelo autor

Posteriormente, as amostras a serem revestidas foram direcionadas ao processo de banho ultrassônico, realizado em três etapas. Primeiramente, foi selecionada uma cuba ultrassônica (Marca: Plana, Modelo: CBU 100/3LDC), para a realização dos banhos nas amostras, onde foram despejados 60 mm de água como auxílio de um becker. Após acrescentar a água na cuba ultrassônica, foram posicionados 3 beckers de 100ml dentro da mesma, onde então foram colocadas em cada becker uma das amostras que passariam pelo experimento, e deu-se início as etapas do banho, conforme demonstrado pela figura 14.

Figura 14 - Banho ultrassônico das amostras da liga AA-5052



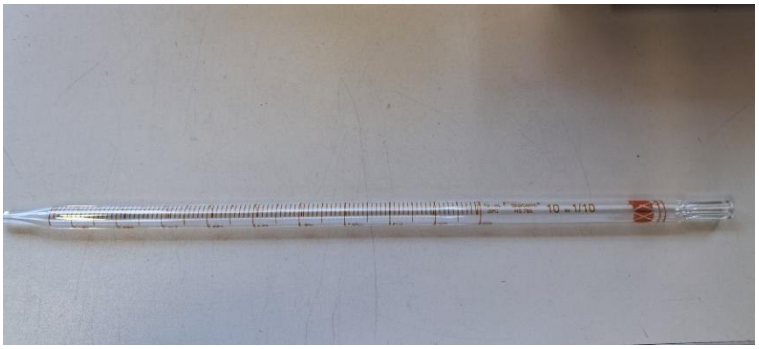
Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Na primeira etapa optou-se pelo banho ultrassônico nas amostras utilizando água destilada (100ml) e detergente para limpeza de bico para cuba ultrassônica (5ml) representado na figura 15, sendo está quantia igual para cada becker de 100ml; vale ressaltar que para acrescentar o detergente foi necessário utilizar uma pipeta volumétrica, representada na figura 16. Para a realização da primeira etapa foi utilizado um tempo de 20 minutos, programados e cronometrados na própria cuba ultrassônica. Após o término do primeiro banho, as amostras foram retiradas dos seus respectivos beckers, e foram secadas com algodão.

Figura 15 - Detergente neutro - limpeza fina das superfícies

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Figura 16 - Pipeta volumétrica



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Após a limpeza, com água e detergente neutro comum, dos beckers utilizados na primeira etapa, deu-se início a segunda etapa.

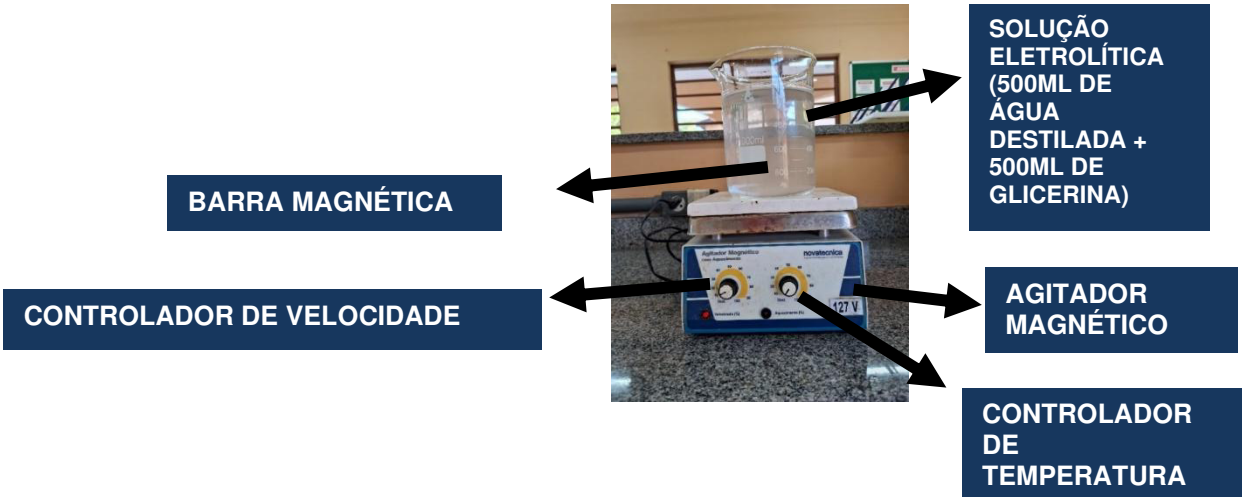
Na segunda etapa, com duração de 20 minutos, as amostras foram expostas somente a 100ml de água destilada, e posteriormente após o término do banho, novamente as amostras passaram pelo processo de secagem com algodão e os beckers pela limpeza da água e detergente neutro.

Na terceira etapa, as amostras foram expostas a 50ml de álcool etílico 99,5%, durante um período de 20 minutos. Após a finalização do terceiro banho, as amostras foram secadas com algodão para serem embaladas com gaze e fita, e foram devidamente identificadas.

Após o término dos processos de limpeza da superfície das amostras, as mesmas já estavam prontas para a realização dos experimentos, entretanto, antes de iniciar os experimentos foi necessário preparar as soluções que seria utilizada.

Para o preparo das soluções eletrolíticas, uma contida por 500ml de água destilada com 500ml de glicerina (Glicerol) - $C_3H_5(OH)_3$, e a outra contida por 1000ml de água destilada com 1g de Negro de Fumo, foram utilizados 2 beckers de 1l cada, que serviram de recipiente para colocar as soluções e mistura-las com o auxílio de um agitador magnético (Marca: Novotecnica, Capacidade de Velocidade: 0 a 100, Capacidade de Temperatura: 0ºC a 100ºC) e uma barra de agitação magnética submersa na solução, durante 30 minutos, onde foi utilizado uma velocidade de 10 e temperatura de 0ºC, porém levando em conta que a temperatura ambiente no dia era de 27ºC. O agitador magnético e as soluções eletrolíticas estão representados pelas figuras 17 e 18.

Figura 17 - Preparo do eletrólito com glicerol



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Figura 18 - Preparo do eletrólito com negro de fumo

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Após o término da mistura, as soluções foram despejadas, armazenadas e devidamente identificadas em garrafas de vidro, levando em conta a segurança e a integridade das mesmas.

Com a limpeza das amostras e as soluções prontas, os experimentos já podiam ser realizados. Para a realização dos experimentos, utilizou-se o esquema constituídos pelos equipamentos representados na figura 19, onde:

[1] Fonte de tensão estabilizada CTRLTECH, com tensão variável de 0 a 1000 V CC, e corrente variável 0 a 20 A CC.

[2] Agitador mecânico FISATOM para soluções até 1,5 litros e potência de 25 W.

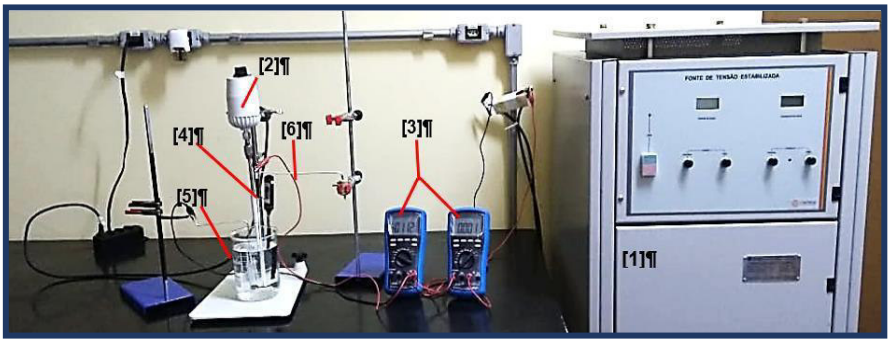
[3] Multímetros MINIPA modelo ET2030A, para medidas de tensões e correntes.

[4] Termômetro MINIPA modelo ET401A, para medidas da temperatura da solução.

[5] Cuba eletrolítica de aço inoxidável ou béquer vidro, para o despejo das soluções.

[6] Haste fina de alumínio AA1050, com 3,25 mm de diâmetro, usada para segurar os substratos dentro da célula eletrolítica. Esta haste é isolada por uma fita de teflon para não participar do processo.

Figura 19 - Equipamento do experimento



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Posteriormente a montagem e fixação dos equipamentos, deu-se início aos experimentos. No total, foram realizados 3 experimentos, caracterizados pela alteração dos parâmetros, visando identificar a melhor condição para se obter o melhor revestimento possível.

As tabelas 9, 10 e 11 representam os parâmetros utilizados em cada experimento.

Tabela 9 - Parâmetros do experimento 1(Amostra 2)

Amostra	Solução	Voltagem	Distância do contra eletrodo	Tempo
1	Água destilada (500ml) + Glicerol (500ml)	500 V	20 mm	30 min

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Tabela 10 - Parâmetros do experimento 2(Amostra 3)

Amostra	Solução	Voltagem	Distância do contra eletrodo	Tempo
1	Água destilada (500ml) + Negro de Fumo (1g)	300 V	20 mm	30 min

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Tabela 11 - Parâmetros do experimento 3(Amostra 4)

Amostra	Solução	Voltagem	Distância do contra eletrodo	Tempo
1	Água destilada (500ml) + Negro de Fumo (1g)	600 V	10 mm	20 min

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Definidos os parâmetros, os experimentos foram iniciados, onde para realizar o controle do tempo, foi utilizado o cronometro de um aparelho celular. Para cada experimento, conforme o tempo passava, a cada minuto, era feita uma checagem do valor da corrente que passava pelo experimento e da temperatura da solução eletrolítica; os valores encontrados foram registrados, e estão representados pelas tabelas 12, 13 e 14.

Tabela 12 - Características do experimento 1(Amostra 2)

Tempo (min)	Corrente (mA)	TºC
0	147	22
1	153	22.6
2	158	23.5
3	161	24.3
4	167	25.1
5	171	25.9
6	175	26.6
7	178	27.3
8	181	27.9
9	185	28.4
10	187	28.9
11	190	29.4
12	191	29.8
13	193	30.3

14	197	30.6
15	198	30.9
16	200	31.3
17	201	31.6
18	203	31.8
19	204	32.1
20	205	32.3
21	208	32.6
22	210	32.8
23	211	33
24	212	33.3
25	212	33.5
26	212	33.7
27	214	33.9
28	214	34.1
29	216	34.2
30	217	34.4
Média	199	30.9

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Tabela 13 - Características do experimento 2(Amostra 3)

Tempo (min)	Corrente (mA)	TºC
0	55	27
1	53	27
2	51	27
3	50	27
4	49	28
5	48	28
6	47	28
7	47	28
8	46	28
9	45	28
10	44	28
11	44	28
12	44	28
13	44	28
14	43	28
15	42	28
16	42	28
17	42	28
18	42	28
19	41	28
20	41	28
Média	48	27.8

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Tabela 14 - Características do experimento 3(Amostra 4)

Tempo (min)	Corrente (mA)	TºC
0	110	23
1	106	23
2	102	23
3	100	24
4	99	24
5	96	24
6	93	24
7	90	24
8	88	24
9	86	24
10	87	24
11	87	24
12	87	24
13	87	24
14	85	24
15	84	24
16	82	24
17	82	24
18	80	24
19	79	24
20	78	24
Média	94,4	23.8

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Após a realização dos experimentos, inicialmente as amostras foram devidamente secadas com algodão e passaram incialmente por uma comparação visual, conforme representado pela figura 20, na qual as amostras revestidas foram comparadas umas com as outras, com o intuito de se concluir em qual amostra foi gerado o melhor revestimento em termos de características visuais; também foi feita a comparação das amostras revestidas com a amostra que não passou pelo processo de revestimento, cuja a finalidade foi avaliar o grau de reação do processo de revestimento sobre a superfície das amostras revestidas.

Posteriormente, as amostras revestidas foram novamente submetidas a pesagem de massa, afim de analisar se as mesmas perderam ou ganharam massa após a formação dos revestimentos em suas superfícies. Para se obter a massa final das amostras, cada uma foi pesada 5 vezes, com o intuito de se obter uma média final. Os valores encontrados estão representados pela tabela 15.

Após a pesagem final das amostras, as mesmas foram levadas até as dependências do Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA), onde as amostras foram submetidas aos ensaios de Microscopia Eletronica de varredura (MEV) e Raio-X e/ou Energy Dispersive Spectroscopy (EDS), para a realização da análise da morfologia microestrutural e da composição química presente na superfície das amostras.

Durante a realização do ensaio de MEV, foram capturadas imagens da superfície das amostras nas ampliações de 500x, 1000x e 3000x, na qual o ponto registrado pela imagem capturada na ampliação de 3000x também foi utilizado como referência para a execução do ensaio de EDS.

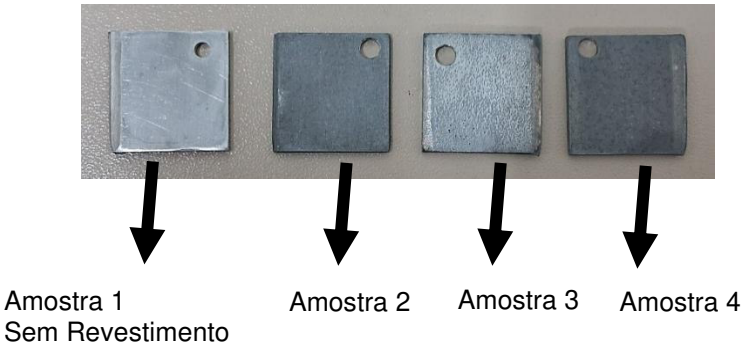
No decorrer da execução do ensaio de EDS, cada elemento químico encontrado nas superfícies das amostras, foram identificados de cores diferentes diante das imagens registradas. Vale ressaltar também foi gerado um gráfico para cada amostra, cujo o objetivo é demonstrar a porcentagem da concentração dos elementos químicos presentes nas respectivas superfícies.

Posteriormente a realização dos ensaios de MEV e EDS, as amostras revestidas foram direcionadas ao teste de microdureza, realizado com a mesma carga e escala do teste de microdureza inicial; na qual foram obtidos os valores listados pela tabela 19. Para a realização do teste final de microdureza, foram selecionados 3 diferentes pontos de medição nas amostras, conforme representado pela figura 33; valendo ressaltar que os pontos selecionados para a realização do teste de microdureza final foram diferentes, em termos de localidade, dos pontos selecionados para a medição da microdureza inicial, visto que também o teste de microdureza final foi realizado em uma superfície da amostra diferente do teste de microdureza inicial.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 COMPARAÇÃO VISUAL DAS AMOSTRAS

Figura 20 - Amostras de alumínio AA-5052 revestidas



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Assim que realizada a comparação visual da amostra sem revestido com as amostras revestidas, conforme representado pela figura 20, foi constatado que o revestimento gerado na superfície da amostra 4 foi o que apresentou as melhores características em termos de homogeneidade, diferentemente da amostra 3, que apesar de sido submetida ao processo de PEO com a mesma solução eletrolítica da amostra 4, não apresentou boas características visuais, ficando evidente em sua superfície a presença do metal base. Entretanto, a amostra 2, que foi submetida ao processo de PEO com solução eletrolítica diferente da amostra 3 e 4, também apresentou boas características visuais em sua superfície, porém não tão boas quanto a superfície da amostra 4.

4.2 MASSA FINAL DAS AMOSTRAS

Tabela 15 - Massa final das amostras

Amostra	2	3	4
1º pesagem	1.6742g	1.7082g	1.6565g
2º pesagem	1.6743g	1.708g	1.6566g
3º pesagem	1.6742g	1.708g	1.6566g
4º Pesagem	1.6743g	1.7081g	1.6567g
5º Pesagem	1.6743g	1.708g	1.6565g
Média	1,67436g	1,708g	1,6566g

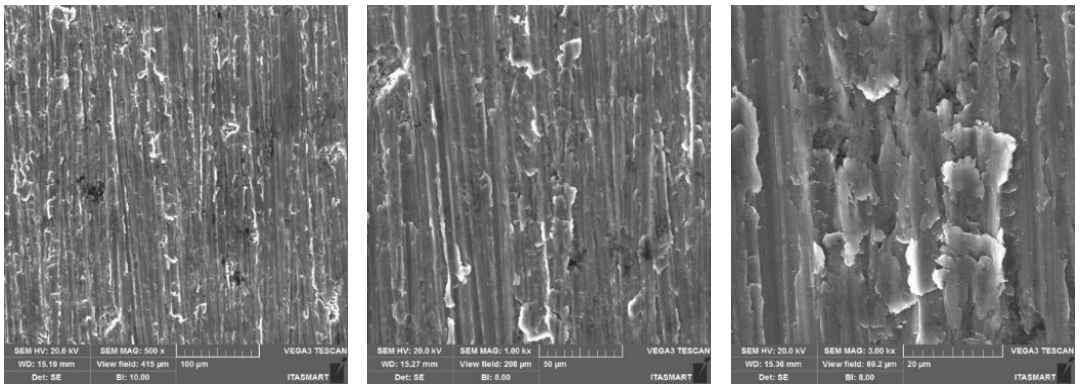
Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Conforme demonstrado pela tabela 15, foi possível observar que a massa da amostra 2, submetida ao processo de PEO com solução de Água Destilada + Glicerol, teve uma queda de 0,03564g após a amostra ser revestida. Já as amostras 3 e 4, submetidas ao PEO com solução de Água Destilada + Negro de Fumo, possuíram os respectivos acréscimos de massa de 0,0634g e 0,0015g.

4.3 ENSAIOS DE MEV DAS AMOSTRAS

4.3.1 Ensaio de MEV da Amostra Sem Revestimento (Amostra 1)

Figura 21 - Analise de MEV da Amostra Sem Revestimento



500X 1000X 3000X

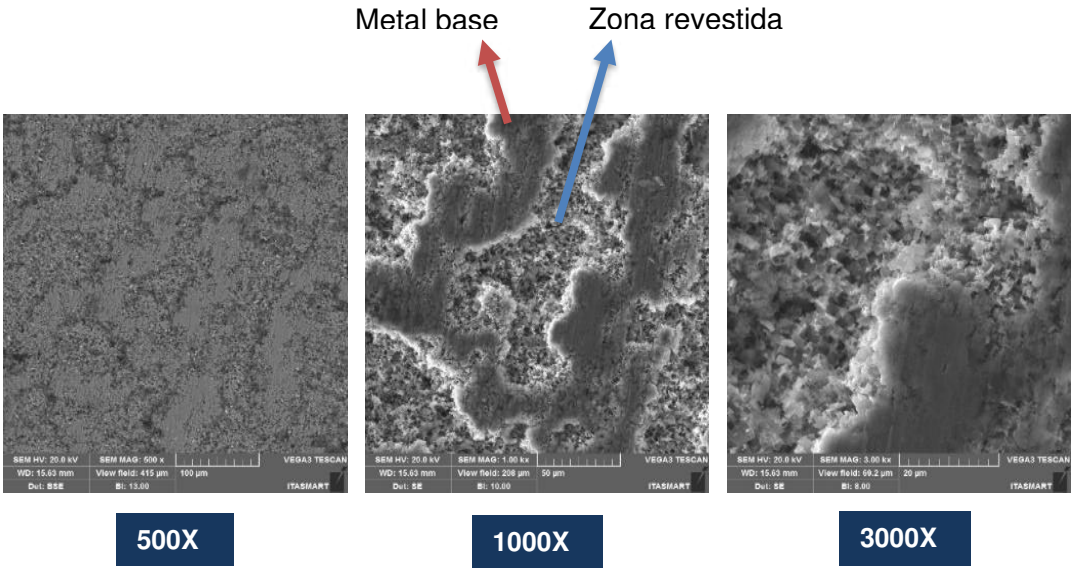
Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Ao analisar as imagens capturadas no ensaio de MEV da amostra sem revestimento, é visível a predominância microestrutural do metal base na superfície da

amostra; caracterizada por apresentar nitidamente um aspecto de alinhamento, sendo essa característica herdada do processo de lixamento do material.

4.3.2 Ensaio de MEV da Amostra 2

Figura 22 - Analise de MEV da Amostra 2



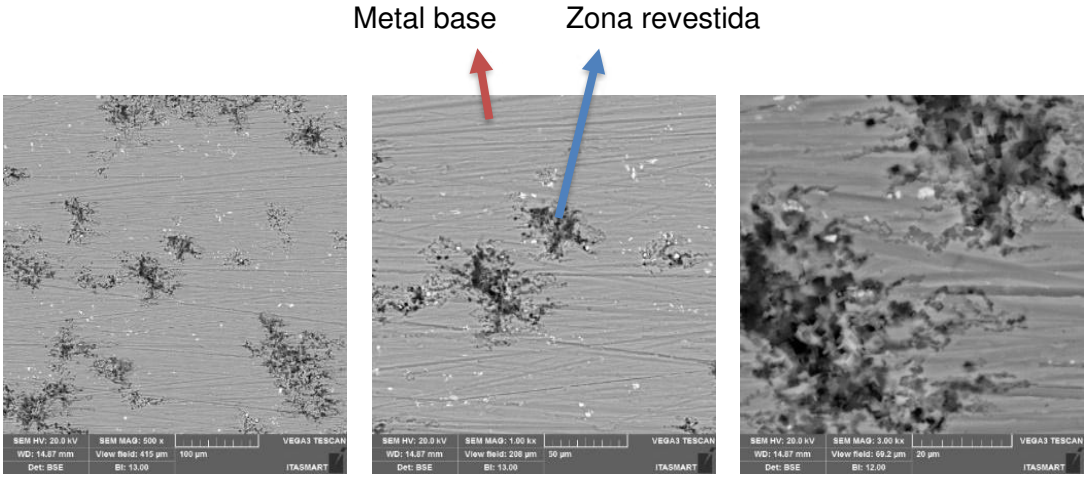
Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Com base nas imagens do ensaio de MEV da amostra 2, é possível analisar a presença do material depositado na superfície da amostra após a realização do experimento. Também é possível notar uma superfície com característica heterogênea, onde é visível a presença de fases microestruturais distintas, de acordo com o metal base e o revestimento gerado; entretanto, quando comparada a superfície da amostra sem revestimento, a superfície da amostra 2 destaca-se por apresentar um aspecto poroso nas zonas revestidas; já as zonas compostas pelas microestruturas do metal base, presentes na superfície da amostra 2, caracterizam-se por apresentar o mesmo aspecto de alinhamento encontrado na superfície da amostra sem revestimento.

Vale ressaltar também que o revestimento gerado apresentou um caráter corrosivo, visto que as fases microestruturais geradas estão mais profundas do que as fases microestruturais do metal base, gerando um aspecto montanhoso na superfície da amostra.

4.3.3 Ensaio de MEV da Amostra 3

Figura 23 - Analise de MEV da Amostra 3

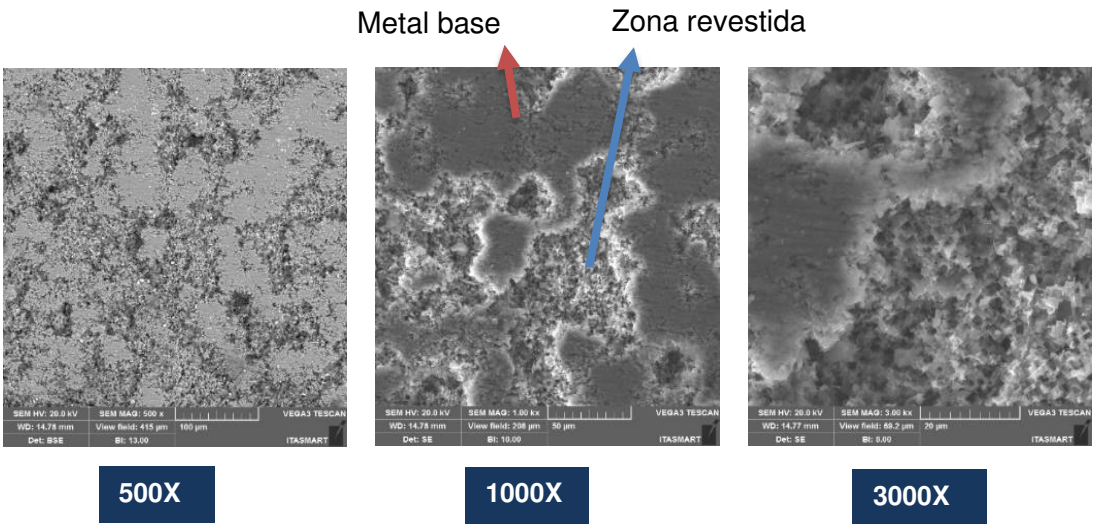


Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Ao observarmos as imagens capturadas no ensaio de MEV da amostra 3, é possível averiguar uma superfície que apresenta uma característica bem heterogênea, onde as fases microestruturais do metal base e do material depositado estão bem distinguidas, por conta da baixa porcentagem de material depositado sobre a superfície do material; tornando visível as fases microestruturais do metal base alinhadas de acordo com o processo de lixamento, assim como as imagens registradas da amostra sem revestimento. Também é possível notar que assim como o revestimento gerado na superfície da amostra 2, o revestimento presente na amostra 3 possui um perfil corrosivo; sendo gerado em diferentes pontos da superfície da amostra.

4.3.4 Ensaio de MEV da Amostra 4

Figura 24 - Analise de MEV da Amostra 4



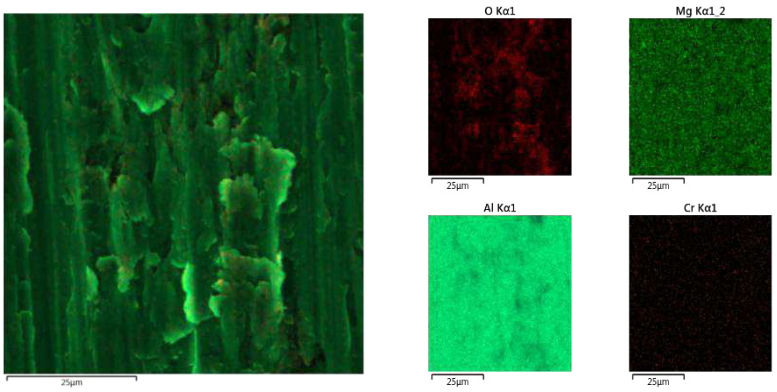
Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Ao analisar as imagens capturadas no ensaio de MEV da amostra 4, também é possível notarmos a presença das fases microestruturais do metal base e do revestimento, que compõem uma morfologia microestrutural com características similares a encontra na amostra 2; entretanto, pode-se notar que as fases microestruturais do metal base apresentam um formando mais arredondado. Também é visível que o revestimento gerado na amostra 4 provocou mais mudanças morfológicas do que o revestimento gerado na amostra 3, embora ambas as amostras tenham passado pelo experimento com a mesma solução eletrolítica.

4.4 ENSAIOS DE EDS DAS AMOSTRAS

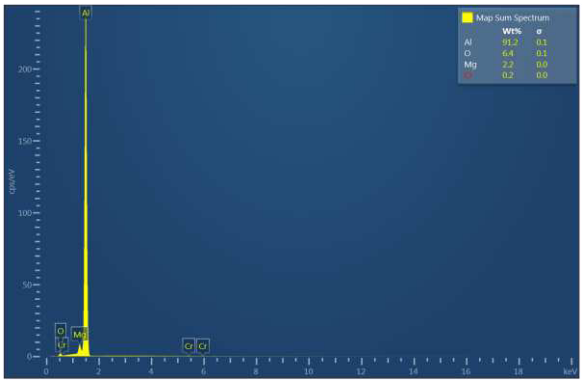
4.4.1 Ensaio de EDS da Amostra Sem Revestimento (Amostra 1)

Figura 25 - Ponto do Ensaio de EDS da Amostra Sem Revestimento



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Figura 26 - Composição Química da Superfície da Amostra Sem Revestimento

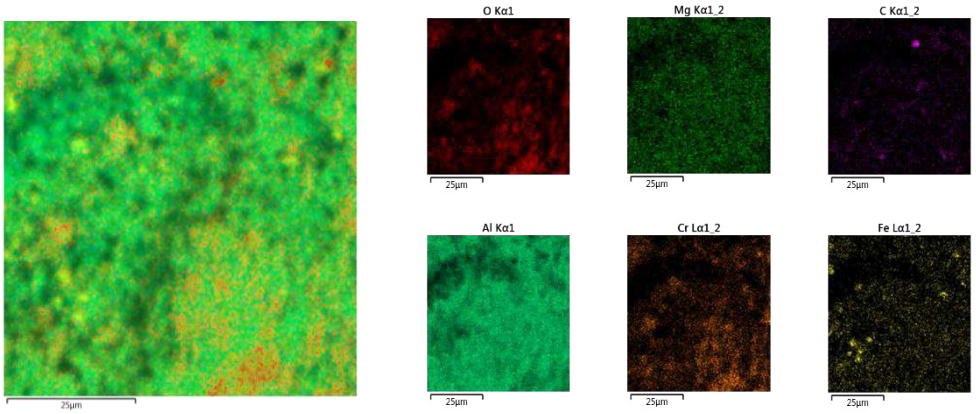


Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Com base na análise das imagens capturadas e do gráfico gerado no ensaio de EDS da amostra sem revestimento, constata-se que o ponto da superfície da amostra que foi selecionado para a execução do ensaio, apresenta uma composição química composta por: 91,2% de alumínio; 6,4% de oxigênio; 2,2% de magnésio e 0,2% de cromo.

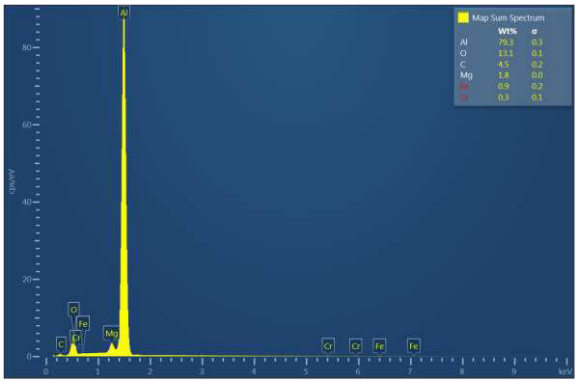
4.4.2 Ensaio de EDS da Amostra 2

Figura 27 - Ensaio de EDS da Amostra 2



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Figura 28 - Composição Química da Superfície da Amostra 2



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Ao analisar as imagens capturadas e o gráfico gerado no ensaio de EDS da amostra 2, constata-se que o ponto da superfície da amostra que foi selecionado para a execução do ensaio, apresenta uma composição química composta por: 79,3% de alumínio; 13,1% de oxigênio; 4,5% de carbono; 1,8% de magnésio; 0,9% de ferro e 0,3% de cromo.

Em relação a composição química encontrada no ponto da superfície selecionado para a realização do ensaio de EDS da amostra sem revestimento, a composição química presente no ponto da superfície da amostra 2 apresenta uma porcentagem menor de alumínio, com uma diferença de 11,9%. Também é evidente

que na superfície da amostra 2, há a presença de elementos químicos que não foram encontrados na amostra sem revestimento, são eles o carbono e o ferro.

A tabela 16 representa a comparação, em termos de porcentagem, dos elementos químicos encontrados na superfície da amostra sem revestimento com os elementos químicos encontrados na amostra 2.

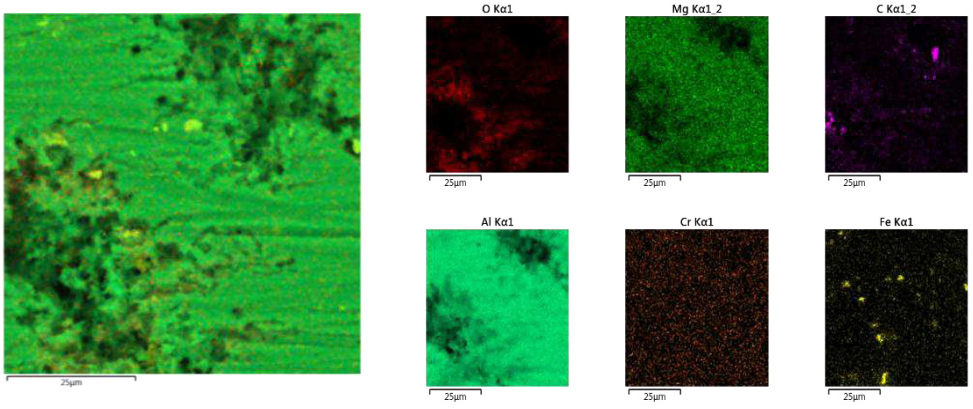
Tabela 16 - Comparação da composição química da Amostra 2

	Amostra sem revestimento	Amostra 2	Diferença
Alumínio	91,2%	79,3%	-11,9%
Oxigênio	6,4%	13,1%	+6,7%
Magnésio	2,2%	1,8%	-0,4%
Cromo	0,2%	0,3%	+0,1%
Ferro	0%	0,9%	+0,9%
Carbono	0%	4,5%	+4,5%

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

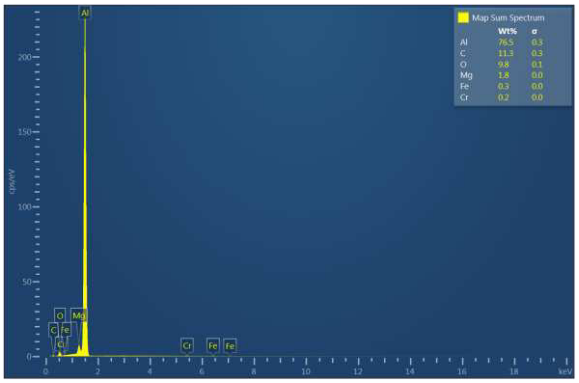
4.4.3 Ensaio de EDS da Amostra 3

Figura 29 - Ponto do Ensaio de EDS da Amostra 3



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Figura 30 - Composição Química da Superfície da Amostra 3



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Mediante a análise das imagens capturadas e o gráfico gerado no ensaio de EDS da amostra 3, compreende-se que o ponto da superfície da amostra 3 que foi selecionado para a realização do ensaio, apresenta uma composição química composta por: 76,5% de alumínio, 11,3% de carbono, 9,8% de oxigênio, 1,8% de manganês, 0,3% de ferro e 0,2% de cromo. Diante da composição química identificada na superfície da amostra 3, reconhece-se que houve uma diminuição na concentração de alumínio, em relação a porcentagem registrada no ensaio da amostra sem revestimento, com uma diferença de 14,7%, sendo esse valor maior do que a diferença obtida na comparação entre a amostra sem revestimento e a amostra 2. Além disso, assim como o ocorrido na amostra 2, também é notável a presença de elementos químicos na superfície da amostra 3, que não foram encontrados na superfície da amostra sem revestimento, são eles: o carbono e o ferro.

A tabela 17, representa a comparação, em termos de porcentagem, dos elementos químicos encontrados na superfície da amostra sem revestimento com os elementos químicos encontrados na amostra 3.

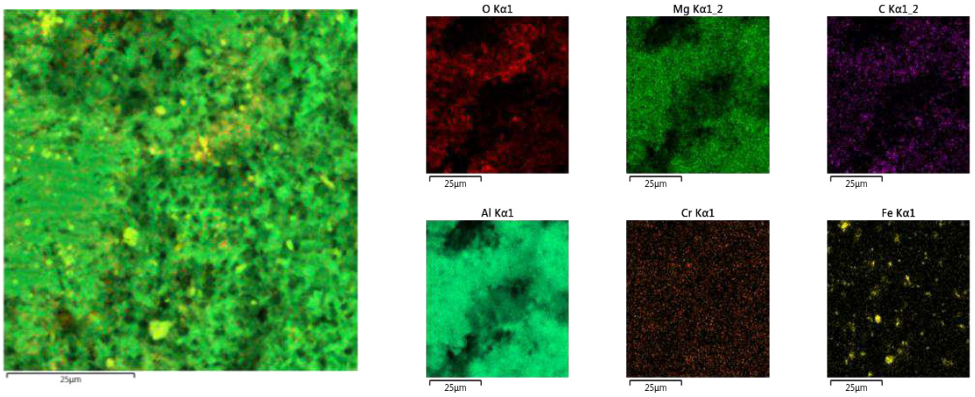
Tabela 17 - Comparação da composição química da Amostra 3

	Amostra sem revestimento	Amostra 3	Diferença
Alumínio	91,2%	76,5%	-14,7%
Oxigênio	6,4%	9,8%	+3,4%
Magnésio	2,2%	1,8%	-0,4%
Cromo	0,2%	0,2%	Manteve
Ferro	0%	0,3%	+0,3%
Carbono	0%	11,3%	+11,3%

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

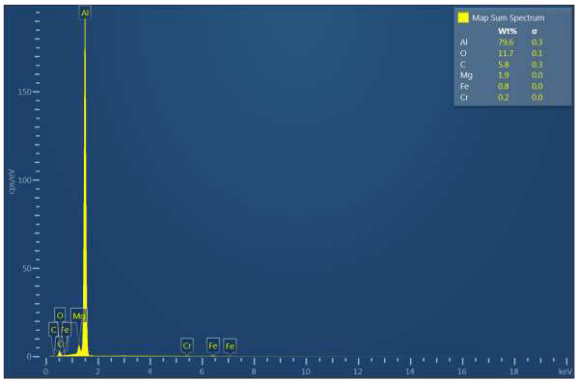
4.4.4 Ensaio de EDS da Amostra 4

Figura 31 - Ponto do Ensaio de EDS da Amostra 4



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Figura 32 - Composição Química da Superfície da Amostra 4



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Ao examinar as imagens registradas e o gráfico gerado no ensaio de EDS da amostra 4, observa-se que o ponto da superfície da amostra que foi selecionado para a execução do ensaio, apresenta uma composição química composta por: 79,6% de

alumínio, 11,7% de oxigênio, 5,8% de carbono, 1,9% de magnésio, 0,8% de ferro e 0,2% de cromo. De maneira geral, pode-se dizer a composição química registrada na superfície da amostra 4 é similar a composição química encontrada nas superfícies das amostras 2 e 3; entretanto, quando comparada a composição química presente na superfície da amostra sem revestimento, a composição química da superfície da amostra 4 apresenta algumas diferenças, como por exemplo a queda da concentração de alumínio, que foi de 11,6%; e a presença dos elementos carbono e ferro.

A tabela 18, representa a comparação, em termos de porcentagem, dos elementos químicos encontrados na superfície da amostra sem revestimento com os elementos químicos encontrados na amostra 4.

Tabela 18 - Comparação da composição química da Amostra 4

	Amostra sem revestimento	Amostra 4	Diferença
Alumínio	91,2%	76,6%	-14,6%
Oxigênio	6,4%	11,7%	+5,3%
Magnésio	2,2%	1,9%	-0,3%
Cromo	0,2%	0,2%	Manteve
Ferro	0%	0,8%	+0,8%
Carbono	0%	5,8%	+5,8%

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

4.4.5 Comparação Geral dos Ensaios

De maneira geral, pode-se dizer que a principal diferença encontrada na comparação da composição química da superfície da amostra sem revestimento com a composição química das amostras revestidas (2, 3 e 4), foi a presença dos elementos químicos ferro e carbono, que estiveram presentes na composição química da superfície de todas as amostras revestidas. Entretanto, quando o gráfico de composição química gerado nos ensaios de EDS das amostras revestidas é comparado com o gráfico gerado no ensaio da amostra sem revestimento, nota-se que mesmo com a geração dos revestimentos nas superfícies das amostras 2, 3 e 4, ainda foi possível registrar uma alta concentração de alumínio e dos elementos que compõem a liga AA 5052, portanto entende-se que os revestimentos gerados não atingiram um grau adequado de

homogeneidade.

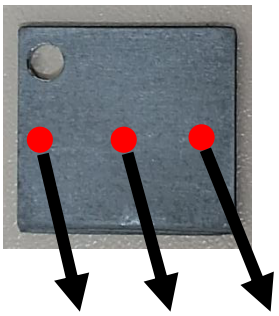
Também é evidente que, houve alterações nas concentrações dos elementos químicos presentes nas superfícies das amostras com a geração dos revestimentos, onde:

- Todas as amostras revestidas obtiveram queda na concentração de alumínio em suas respectivas superfícies.
- A concentração de oxigênio presente registrado na superfície de todas as amostras revestidas, foi maior que a porcentagem registrada na superfície da amostra sem revestimento.
- Na superfície de todas as amostras revestidas, houve uma queda da concentração de magnésio em relação a porcentagem registrada na superfície da amostra sem revestimento.
- A concentração de cromo registrada na superfície das amostras 3 e 4, foi a mesma registrada na amostra sem revestimento; sendo esse valor inferior ao registrado na superfície da amostra 2.

Embora as amostras 3 e 4 tenham passado pelo processo de PEO com a mesma solução eletrolítica, a porcentagem de ferro e carbono registrados na superfície de ambas, foram diferentes; onde a amostra 3, apresentou a maior porcentagem de carbono, e a amostra 4 a maior porcentagem de ferro. No entanto, a amostra 2 que foi exposta ao processo de PEO com uma solução eletrolítica diferente da utilizada nos experimentos das amostras 3 e 4, apresentou a maior porcentagem de concentração ferro e a menor porcentagem de concentração de carbono.

4.4 MICRODUREZA FINAL DAS AMOSTRAS

Figura 33 - Pontos de Medição da Microdureza Final das Amostras



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Tabela 19 - Microdureza final das amostras revestidas

Amostra	2	3	4
Ponto 1	62,9 HV	65,10 HV	69,70 HV
Ponto 2	63 HV	65,15 HV	69,76 HV
Ponto 3	62,7 HV	65,10 HV	69,74 HV
Média	63HV	65,16HV	69,76HV

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Com base nos valores registrados na tabela 19, foi possível observar que a massa da amostra 2, submetida ao PEO com solução de Água Destilada + Glicerol, teve uma queda de 16,96HV em sua microdureza superficial, após a amostra ser revestida. Já as amostras 3 e 4, submetidas ao PEO com solução de Água Destilada + Negro de Fumo, também possuíram queda em suas respectivas microdurezas superficiais, com diferenças de 17,1HV e 27,34HV.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o objetivo de se definir a melhor condição de ensaio para a geração de um revestimento homogêneo, por meio da caracterização e comparação das alterações sofridas nas superfícies de três amostras da liga de alumínio AA-5052, submetidas ao processo de Oxidação eletrolítica a Plasma, foram executados procedimentos de preparo superficial das amostras, visando garantir que as superfícies estariam limpas de impurezas, para que então os ensaios pudessem ser realizados, de acordo com os parâmetros selecionados, que foram variados de um ensaio para o outro. Para fins de comparação, algumas informações (massa e microdureza superficial) das amostras a serem revestidas foram coletadas antes da exposição das mesmas aos ensaios, pois essas mesmas informações seriam comparadas com os dados coletados após a geração dos revestimentos.

Utilizando uma amostra da liga de alumínio AA-5052 como referência, foi realizada a comparação visual e as comparações das alterações sofridas na morfologia microestrutural e na composição química da superfície das amostras revestidas, por meio da execução de ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura e Raios-X, na qual, foi constatado que os revestimentos gerados são de caráter corrosivo, e modificam as características superficiais das amostras; além de alterarem a massa do material. No entanto, a superfície das amostras revestidas, apresentaram uma morfologia microestrutural constituída por duas fases (metal base e zona revestida) e uma composição química com alta concentração de alumínio.

Portanto, conclui-se que embora tenham ocorridas alterações na morfologia microestrutural, na composição química e na microdureza da superfície das amostras revestidas, e alterações nas massas das amostras revestidas, nenhuma das condições de ensaios foi suficiente para geração de um revestimento de caráter homogêneo.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

ALBERGARIA, Leonardo. **Alumínio e Materiais metálicos Não Ferrosos**. SlideShare, 2017. Disponível em: https://pt.slideshare.net/leonardoalbergaria3/aluminio-materiais-metlicos-no-ferrosos-1. Acesso em: 25 jul. 2024.

CAMPOS, Heloísa Gonçalves. **Propriedades mecânicas de compósitos à base de alumina e zircônia com adição de céria**. 2016. 130 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2016. Orientadora: Profa. Dra. Annelise Kopp Alves. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/142465/000993294.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 25 jul. 2024.

CORTINHAS, Ernani Augusto da Silva. **Avaliação das propriedades mecânicas da liga de alumínio AA5052 – H34**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2019. Disponível em: https://ppgei.propesp.ufpa.br/ARQUIVOS/dissertacoes/2019/ERNANI%20AUGUSTO%20DA%20SILVA%20CORTINHAS.pdf. Acesso em: 25 jul. 2024.

COSTA, Victoria Venceslau Silva. **Estudo sobre a curva S-N para análise de resistência à fadiga da liga de alumínio 7075-T651**. 2019. Projeto de Graduação (Engenharia Mecânica) - Universidade de Brasília, Brasília, 2019. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/26054/1/2019_VictoriaVenceslauSilvaCosta_tcc.pdf. Acesso em: 25 jul. 2024.

GIANELLI, Bruno Fernando. **Avaliação de ciclo de vida comparativa dos processos de anodização e oxidação eletrolítica com plasma de liga de alumínio**. 2014. 120 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências, 2014.

LESSA, Bianca Lemos. **Anodização e Caracterização da Liga de Alumínio 6351 T6**. 2021. 35 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Aeroespacial) - Universidade de Brasília, Faculdade UnB Gama, Brasília, DF, 2021. Orientador: Prof. Rhander Viana. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/31775/1/2021_BiancaLemosLessa_tcc.pdf. Acesso em: 25 jul. 2024.

OLIVEIRA, **Cláudia Regina de. Caracterização de revestimentos de alumina obtidos por oxidação anódica em ligas de alumínio 6351 e 7075**. 2010. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Bauru, Bauru, SP, 2010. Orientador: Prof. Dr. Marcelo Falcão de Oliveira. Disponível em: https://web.archive.org/web/20180602134912id_/http://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/bba/33004056083P7/2010/oliveira_cr_me_bauru.pdf. Acesso em: 25 jul. 2024.

OLIVEIRA, Eduardo Reis de. **Correlação Entre Microestruturas e Propriedades Mecânicas de Ligas Al-Mg Solidificadas Unidirecionalmente**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017. Disponível em: https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/12906/1/Arquivototal.pdf. Acesso em: 25 jul. 2024.

PAVANATI, Henrique C. **Apostila de Introdução à Teoria das Máquinas e Equipamentos**. 2010. Disponível em: https://pavanati.com.br/doc/Apostila_ITM_Henrique_C_Pavanati_%28nov2010%29.pdf. Acesso em: 5 dez. 2024.

SCHAEFFER, Cláudio. **Tecnologia dos Materiais: complementar**. Disponível em: https://docente.ifsc.edu.br/claudio.schaeffer/material/2_Mecatr%C3%B4nica/Materiais_1_Meca_2/Tecnologia%20dos%20Materiais_Complementar.pdf. Acesso em: 25 jul. 2024

SILVA, João Carlos da. **Investigação da Usinabilidade de Ligas Metálicas**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em: https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14911/1/Investiga%C3%A7%C3%A3oUsinabilidadeLigas%20.pdf. Acesso em: 25 jul. 2024.

SOTTOVIA, Livia. **Utilização de lama vermelha para oxidação eletrolítica assistida por plasma de liga de alumínio.** 2015. 154 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia, 2015.

SOUSA, Marcelo do Nascimento. **Influência das Propriedades Mecânicas das Ligas de Alumínio na Usinabilidade - Foco no Grau de Recalque, na Dimensão da Zona de Fluxo e na Microdureza dos Cavacos**. 2013. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2013. Disponível em: https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14741/1/InfluenciaPropriedadesMecanicas.pdf. Acesso em: 17 jul. 2024.

TAVARES, Matheus de Medeiros. **Oxidação por plasma eletrolítico em superfícies de alumínio comercial**. 2018. 85 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, RN, 2018. Orientador: Prof. Dr. Clodomiro Alves Júnior. Disponível em: https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/c36467dd-f807-4660-bda2-9ea315297085/content. Acesso em: 25 jul. 2024.