



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ABAETETUBA
FACULDADE DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA-FACET
LICENCIATURA EM FÍSICA

MAURI SILVA MELO

**ANÁLISES ELÉTRICA E MORFOLÓGICA DO EFEITO DE REVESTIMENTO
DE COBRE SOBRE CONDUTORES ELÉTRICOS DE ALUMÍNIO LIGA 1350**

ABAETETUBA-PA

2023

MAURI SILVA MELO

**ANÁLISES ELÉTRICA E MORFOLÓGICA DO EFEITO DE REVESTIMENTO
DE COBRE SOBRE CONDUTORES ELÉTRICOS DE ALUMÍNIO LIGA 1350**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para a obtenção de título de Licenciado em Física, pela Universidade Federal do Pará – UFPA, na Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia-FACET, Campus Universitário de Abaetetuba.

Orientador: Prof. Dr. Elder Augusto Viana Mota.

ABAETETUBA-PA
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- M528a Melo, Mauri Silva.
 Análises elétrica e morfológica do efeito de revestimento de
 cobre sobre condutores elétricos de alumínio Liga 1350 / Mauri
 Silva Melo. — 2023.
 28 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Elder Augusto Viana Mota
 Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
 Federal do Pará, Campus Universitário de Abaetetuba, Curso de
 Física, Abaetetuba, 2023.
1. Fios de alumínio (AL-1350). 2. Revestimento de cobre.
 3. Galvanoplastia. 4. Microscopia eletrônica de varredura. 5.
 Resistência elétrica. I. Título.

CDD 530

MAURI SILVA MELO

**ANÁLISES ELÉTRICA E MORFOLÓGICA DO EFEITO DE REVESTIMENTO
DE COBRE SOBRE CONDUTORES ELÉTRICOS DE ALUMÍNIO LIGA 1350**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como
requisito para a obtenção de título de Licenciado em
Física, pela Universidade Federal do Pará – UFPA, na
Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia-FACET,
Campus Universitário de Abaetetuba.

Orientador: Prof. Dr. Elder Augusto Viana Mota.

Data de aprovação: __/__/____

Conceito:

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Elder Augusto Viana Mota
(Presidente-Orientador FACET-UFPA)

Prof. Dr. Fabrício Augusto dos Santos Rodrigues
(Membro Interno FACET-UFPA)

Prof. Dr. John Everton Batista Barbosa
(Membro Interno FACET-UFPA)

Prof. Me. Dhonata Sebastião Caldas Oliveira
(Membro Externo)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por ter me dado saúde, força e sabedoria para concluir este trabalho. Agradeço aos meus pais, Lilia e Rosinaldo, pelo sacrifício que passaram para me fornecer a oportunidade de uma melhor educação, além do amor, apoio e incentivo que me deram durante toda minha vida acadêmica, sem vocês nada disso estaria acontecendo.

Agradeço ao professor Dr. Fabrício Augusto dos Santos Rodrigues, pela amizade, paciência, pelo auxílio no desenvolvimento desta pesquisa e por estar sempre presente em vários momentos importantes da minha vida acadêmica, repassando conhecimento e experiências profissionais e de vida.

Ao meu orientador, professor Dr. Elder Augusto Viana Mota, pela orientação, ensinamentos e confiança que depositou em mim.

À UFPA campus de Abaetetuba, pela oportunidade de estudar e utilizar os laboratórios de química, laboratórios de física e Laboratório de pesquisa LFCAnano, LFCA (Laboratórios de Física do Campus de Abaetetuba), que foram cruciais para o desenvolvimento dessa pesquisa. Agradeço a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho investigou os efeitos que o revestimento de cobre (Cu) causa em fios de alumínio (Al-1350) através do processo de eletrólise. Esses fios são utilizados na fabricação de cabos para serem comercializados nas linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica. A realização do trabalho tem o intuito de utilizar esse processo de eletrodeposição para diminuir a resistência elétrica dessa liga de Al e consequentemente aumentar a condutividade elétrica do material. Utilizando o processo de exposição eletroforética com uma solução de sulfato de cobre dissolvido em água, como solução eletrolítica, sob uma corrente que varia entre 1(A) a 1.5 (A) e uma tensão fixa de 1 V, foram adotados parâmetros que mais se adequem com o aumento da condutividade do material. A técnica de microscopia eletrônica de varredura foi utilizada para fazer a caracterização morfológica do material, e medidas de resistência elétrica foram utilizadas para verificar a eficiência da eletrodeposição na condutividade do fio. Os resultados mostram que houve uma diminuição na resistência elétrica de aproximadamente 7% em relação ao condutor padrão de alumínio. Portanto, a partir desses resultados, pode-se dizer que esse processo de eletrodeposição pode se tornar uma ferramenta promissora no avanço da busca por condutores elétricos nanoestruturados, que possibilitem aumentar a qualidade dos cabos de alta tensão.

Palavras-chave: fios de alumínio (Al-1350); revestimento de cobre; galvanoplastia; microscopia eletrônica de varredura; resistência elétrica.

ABSTRACT

This work investigated the effects that copper (Cu) plating causes on aluminum wires (Al-1350) through the electrolysis process. These wires are used in the manufacture of cables to be sold in electrical energy transmission and distribution lines. The aim of carrying out this work is to use this process to reduce the electrical resistance of the Al alloy and consequently increase the electrical conductivity of the material. Using the electrophoretic exposure process with a solution of copper sulfate dissolved in water, as an electrolytic solution, under a current that varies between 1(A) and 1.5 (A) and a fixed voltage of 1 V, we adapt parameters that best suit the increasing of conductivity in the material. The scanning electron microscopy technique was used to carry out the morphological characterization of the material, and electrical resistance measurements were used to verify the efficiency of electrodeposition on the conductivity of the wire. The results show that there was a decrease in electrical resistance of approximately 7% compared to the standard aluminum conductor. From these results, it can be said that this electrodeposition process can become a promising tool in advancing the search for nanostructured electrical conductors that make it possible to increase the quality of high voltage cables.

Keywords: aluminum wires (Al-1350); copper coating; electroplating; scanning electron microscopy; electrical resistance.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	8
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	9
2.1 Revisão bibliográfica	10
2.1.1 Fios condutores de Alumínio ligas 1350 e suas propriedades	10
2.1.2 Propriedades dos Condutores de Cu	12
2.1.3 Eletrólise/Eletrodeposição.....	13
2.1.4 Morfologia do cobre depositado através da eletrólise.....	14
2.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	15
2.2.1 Materiais.....	15
2.2.2 Realização da galvanoplastia	15
3 RESUTADOS E DISCUSSÕES	18
CONCLUSÃO.....	23
REFERÊNCIAS	25

1 INTRODUÇÃO

A realização de uma análise mais abrangente sobre condutores elétricos é importante para obter um maior conhecimento sobre suas propriedades, tais como: condutividade elétrica, térmica, desempenho mecânico dentre outros (Park *et al.*, 2021). Assim, Cavalcante *et al.* (2006) relatam que o cobre (Cu) e o alumínio (Al) são materiais muito utilizados para geração, transmissão e distribuição de energia, além de serem amplamente empregados na confecção dos mais diversos equipamentos elétricos e eletrônicos.

No entanto, parte considerável de energia acaba sendo dissipada nos fios condutores por perdas técnicas, principalmente por efeito Joule e problemas como o processo de corrosão, onde este último faz com que os cabos de condução sofram degradações e falhas completas ou parciais em seu desempenho elétrico e mecânico quando expostos a ambientes hostis. O processo corrosivo acarreta deterioração de um metal, causando reações de oxidação e redução (redox), fazendo com que este se transforme em um óxido ou hidróxido (Kreislóva *et al.*, 2013; Silva *et al.*, 2015; Lepak-Kuc *et al.*, 2018).

Esses processos são uma das principais causas do desgaste de cabos condutores no Brasil. Dados obtidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (2021), mostra que no intervalo de tempo de 2020 a 2021, o percentual de perdas técnicas chegou a 7,6%, custando aproximadamente R\$ 7,8 bilhões, tal valor obtido pela multiplicação de valores dos preços médios da energia nos processos tarifários, sem considerar impostos. Isso explica a grande problemática causada pela existência de perdas de energia elétrica, advindo de aquecimento dos cabos, corrosão, efeito joule e outros. (Toirov; Alimkhodjaev; Pardaboev, 2021).

Situações como essa, necessitam de um certo tipo de atenção. Sendo assim, a constante busca pela criação de novas tecnologias que aumente a eficiência de materiais condutores, é fruto do crescimento da demanda por esses novos materiais (Papageorgiou *et al.*, 2020). No Brasil, essas demandas advêm de três tipos de consumo: industrial, comercial e residencial. Mesmo com apenas essas três classes consumidoras, o setor ainda precisa de investimentos, principalmente nos segmentos de geração e transmissão de energia (Schmidt; Lima, 2004). Por isso, a preocupação em expandir e modernizar o setor

ainda persiste, tornando-se necessário desenvolver condutores mais eficientes com capacidades elétricas cada vez maiores (Toirov; Alimkhodjaev; Pardaboev, 2021).

Desse modo, surgiu a necessidade de se estudar e adotar vários parâmetros experimentais que podem ser utilizados para melhorar a eficiência desses materiais, de tal forma que se possa, por exemplo, melhorar a capacidade térmica desses condutores, para que haja a diminuição do efeito joule e o aumento da condutividade elétrica dos fios de Al. É importante enfatizar que tudo isso deve ocorrer, sem que haja uma diminuição da mecânica do material. Com tudo isso, o objetivo geral é realizar análises morfológicas através desse processo de eletrodeposição que possibilite adotar os melhores parâmetros na criação desse novo material condutor que acarretará as vantagens citadas anteriormente nesse parágrafo.

A liga Al-1350 traz uma confiabilidade significativa na utilização como material para a confecção de cabos para as linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica, pois suas propriedades fazem com que ela agüente variações de corrente elétrica, seja por picos de demanda ou por fenômenos atmosféricos indesejados, como descargas elétricas (Cavalcante *et al.*, 2006). Apesar de todas as suas excelentes propriedades, a liga Al-1350 ainda apresenta perdas de energia por dissipação. Portanto, de maneira a melhorar as suas propriedades, foi efetuado o processo de eletrodeposição (também chamado de galvanoplastia) de maneira a fazer um revestimento de Cu nos fios de Al-1350, que funcionará como uma película protetora que acarretará diversas vantagens para as propriedades do fio (Rodrigues *et al.*, 2022).

Logo, torna-se uma motivação muito importante que haja uma busca em prol do desenvolvimento de novos materiais com propriedades elétricas mais avançadas, que possibilitem criar cabos com menores densidades, com alta condutividade elétrica e térmica, resistência à tração, além da resistência à fluência como: corrosão e oxidação. Esta pesquisa tem o intuito de desenvolver novos cabos de alta ampacidade, com boas propriedades elétricas, com um custo menor e melhor precisão, evitando assim, grandes perdas de energia, para que futuramente sejam utilizados nas linhas de distribuição e transmissão de energia.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são colocados os materiais utilizados no desenvolvimento da pesquisa, assim como os aspectos teóricos nos quais estão embasados os conceitos desenvolvidos ao longo da pesquisa.

2.1 Revisão bibliográfica

2.1.1 Fios condutores de Alumínio ligas 1350 e suas propriedades

O alumínio possui inúmeras vantagens que podem ser facilmente abordadas nesta pesquisa, dentre elas, está a sua condutividade elétrica, que pelo padrão internacional de cobre recozido (IACS), o valor de condutividade para Al puro é 61%, em que o torna a terceira melhor condutividade dos chamados metais não preciosos, perdendo apenas para o cobre e prata (Freitas *et al.*, 2009; Mohtar, Jamal e Sulaiman, 2004).

Essa propriedade de alta condutividade elétrica não serve para todos os tipos de liga Al, ou seja, elas são divididas por séries, como por exemplo: as ligas da série 1XXX, que contém 99% de pureza. Esta liga não é fundida com outro material e nem recebe algum tipo de tratamento térmico, pois podem diminuir de maneira considerável a condutividade do material. No entanto, possui algumas impurezas que não a possibilitam ser 100% pura (Kalombo *et al.*, 2015). Com isso, existem também as ligas da série 6XXX, que geralmente apresentam magnésio e silício em sua composição, isto é, a liga foi modificada (através de dopagem, por exemplo) para melhorar alguma propriedade, que no caso da 6201, a propriedade mecânica que foi aprimorada consideravelmente (Ryen *et al.*, 2016; Kalombo *et al.*, 2015).

A liga 1350 possui uma certa inferioridade em questão de mecânica quando comparado ao 6201, no entanto, possui ótimas propriedades elétricas (Câmara, 2020; Vieira *et al.*, 2021). Além disso, a problemática de sua mecânica frágil pode ser sanada através de instalações com alma de aço (AA) (Freitas *et al.*, 2009; Vieira *et al.*, 2021). O 6201 já apresenta características em sua composição como magnésio e o silício que deixam suas propriedades mecânica relativamente boas, pois eles são justamente os responsáveis pelo endurecimento da liga por meio de precipitação. Entretanto, sua resistência a fadiga deixa a desejar na comparação com o 1350 justamente pela sua alta dureza, ocasionado pela quantidade de silício e magnésio adicionado no Al puro, que por sua vez, podem influenciar na estequiometria do material, acarretando precipitados que afetam diretamente no comportamento à fadiga (Nascimento *et al.*, 2022; Vieira *et al.*, 2021).

A fadiga é uma das falhas mais comuns em metais, que acarreta uma propagação de trincas que, com sua evolução, consequentemente resultará em uma falha estrutural do cabo. Sendo assim, umas das principais causas que acarreta esse fenômeno está diretamente ligado com as tensões oscilantes (cargas cíclicas) nos cabos condutores de Al, principalmente os que estão localizados em ambiente hostis. Desse modo, a fadiga

ocorre mesmo contendo valores inferiores ao limite de resistência a tração (Dowling, 2013; Gamboni *et al.*, 2014).

Desse modo, a liga de alumínio Al-1350 destaca-se cada vez mais no meio industrial de condutores elétricos, pois além das vantagens relacionadas a condução elétrica, ela possui uma grande resistência a lugares que tem uma atmosfera oxidante em metais, como os lugares salinos, que são considerados ambientes mais agressivos aos cabos condutores de eletricidade (Gamboni, 2014). Além disso, apresentam maior leveza, com facilidade para reciclagem e menor custo de produção (Freitas *et al.*, 2009).

Sob essas circunstâncias abordadas anteriormente, Vieira *et al.* (2021) utilizaram dois tipos de condutores de (Al) em sua pesquisa, um formado pela liga 6201 e outro pela liga 1120. Essas ligas foram escolhidas para realizar um estudo comparativo experimental relacionado a fadiga desses dois tipos de condutores. Com isso, alguns resultados obtidos pelos autores causaram uma certa surpresa quando foram comparados, pois o pressuposto seria que a resistência mecânica da liga Al-6201 fosse maior que da liga Al-1120. No entanto, eles receberam resultados controversos justamente pela resistência a fadiga do 6201.

Embora Vieira *et al.* (2021) tiveram uma surpresa em relação ao resultado, outras pesquisas como a de Kalombo *et al.* (2015) apresentaram resultados semelhantes. Porém, os ensaios foram realizados com as ligas 1350 e 6201. Assim, quando foram comparadas as propriedades mecânicas dessas duas ligas, notou-se que os condutores de Al-1350 obtiveram uma maior durabilidade em fadiga em relação a liga Al-6201. Desse modo, os resultados obtidos por Vieira *et al.* (2021) e Kalombo *et al.* (2015) mostraram sinais de que os fios da liga de Al-6201 não possuem uma resistência a fadiga tão boa quando comparados aos cabos das ligas com série 1XXX, como é mostrado em muitos trabalhos já existentes.

Nesse sentido, observou-se que a liga 6201 não apresenta uma boa resistência mecânica a fadigas quando exposta a ambientes oxidantes, pois, os fragmentos de metal são arrancados do fio, deixando-o sujeito a oxidação decorrentes do ambiente devido as partículas de óxidos que ficam presas na superfície do material, o que por sua vez, resulta no desgaste dos cabos. Essa discussão torna-se bastante complexa, pois notou-se que nem sempre um material com boa resistência mecânica pode ser intitulado como o “melhor”, visto que ainda existem características como corrosão, fadiga e fluência, que podem fazer com que esse material se torne mais vulnerável que o esperado (Vieira *et al.*, 2021; Kalombo *et al.*, 2015).

2.1.2 Propriedades dos Condutores de Cu

Neste tópico é feita uma breve descrição sobre o cobre puro, com intuito de apresentar um resumo de suas propriedades físicas. O cobre tem uma alta condutividade térmica e elétrica, por conta disso, ele acaba se tornando um dos metais condutores mais abundantes no mercado. Além disso, torna-se também uma boa escolha para criação de novos condutores como fios elétricos macroestruturais, que posteriormente formam-se uma das principais partes de condutores nanoestruturados com NTC (nanotubo de carbono) (Rodrigues, 2023). Ele também é utilizado em terminações elétricas, além de servir como conectores em diversos dispositivos eletrônicos como exemplo: cabos USB, HDMI, RCA e outros. O Cu é usado em peças de disjuntores de circuitos elétricos, pois com suas excelentes propriedades para essa aplicação, ele se torna um material essencial para fabricação de equipamentos eletrônicos (Li; Zinkle, 2012).

O cobre possui aplicações em diversas áreas referente a tecnologia, devido à gama de propriedades relacionadas principalmente à eletricidade e a sua resistência mecânica, que por sua vez podem ser facilmente trabalhadas, pois sua fácil capacidade de se fundir com outro material possibilita que ele seja usado para criação de novos materiais com propriedades mais avançadas. Além do mais, ele possui uma boa resistência a fluência (Rodrigues, 2023; Chapman, 2016).

Ainda segundo Chapman (2016), a condutividade elétrica é afetada quando estão presentes muitas impurezas e elementos concentrados contidos neste material que o compõe, pois existem materiais que melhoram a resistência mecânica ao serem misturados com outros elementos químicos, mas em consequência, diminui a condutividade elétrica. Com isso, o cobre puro possui um teor mínimo de 99,3% de pureza. Ademais, sua condutividade elétrica é muito elevada pela baixa concentração de impurezas, chegando a 100% de IACS (International Annealed Copper Standard), que significa, padrão internacional de cobre recozido. Por causa dessa alta condutividade elétrica, o cobre é muito necessário para ser utilizado em muitos equipamentos eletrônicos (Li; Zinkle, 2012).

Este valor de 100% de IACS do Cu foi descoberto em outrora, pois em 1913 houve uma enorme melhora na tecnologia de processamento do cobre de alta condutividade, isso fez com que seu IACS se tornasse parâmetro para expressar a condutividade elétrica de todas as outras ligas de condutores (Chapman, 2016).

Nesse sentido, outro fator importante que pode alterar essa condutividade elétrica do cobre, é o teor de oxigênio, o qual tem que ser controlado de maneira cuidadosa na

utilização do Cu. Assim, torna-se evidente que a presença de impurezas na solução afeta diretamente a condutividade elétrica do cobre (Chapman, 2016). Entretanto, se o oxigênio elevado também estiver presente, muitas impurezas formam óxidos, que diminuem a condutividade elétrica do material. Além disso, diminuem também os depósitos de Cu nas soluções eletroquímicas contendo aditivos, como é o caso deste trabalho (Chapman, 2016; Hung, 1988).

2.1.3 Eletrólise/Eletrodeposição

Para contextualizar, o termo eletrólise em grego significa “decomposição por ação da eletricidade”, também chamada de eletrodecomposição. Esse processo é um método que separa elementos químicos de um composto através da eletricidade, ou seja, será montado um circuito elétrico, na qual, a chapa de Cu faz a função do cátodo (polo positivo) e o fio de Al assume a função de ânodo (polo negativo) (Rodrigues, 2023). Sendo assim, mergulhado em uma solução de sulfato de cobre dissolvido em água, aplica-se uma eletricidade através de uma fonte de tensão, criando um campo elétrico para que haja essa separação do elemento químico. A deposição do metal acontece devido uma aplicação de tensão no circuito montado com a chapa de cobre e o fio de alumínio na solução eletroquímica. Isso faz com que os íons positivos se movam através de um campo elétrico em direção aos elétrons próximos ao cátodo, que por sua vez, estão carregados negativamente (Akbari *et al.*, 2022).

Antes de tudo, para que ocorra de forma correta o processo, precisa-se observar o que a eletrodeposição provoca no material, isto é, será preciso adotar parâmetros para não obter rugosidade (rugosidade causa aumento da resistência elétrica), pois o ar fica facilmente preso nas aberturas da superfície rugosa, ocasionando o aparecimento de óxidos, que são justamente os responsáveis por diminuir a condutividade elétrica do material (Hung, 1988; Chapman, 2016; Qing *et al.*, 2017).

Para Akbari *et al.* (2022), a eletrodeposição é um método bastante eficaz, econômico e rápido de ser realizado. Ele é muito usado para obter novas estruturas em materiais de superfície sólida. No entanto, parâmetros como: controlar o tempo da exposição do material a eletrodeposição, a tensão a ser aplicada, acidez da solução e outros, devem ser controlados para que o processo ocorra com eficácia, pois eles podem mudar significativamente na morfologia e estrutura da deposição (Jack; Snyder, 2010).

A galvanoplastia (Deposição eletroquímica ou Eletrodeposição), é composta por célula eletrolítica que contém um eletrodo de trabalho (placa de cobre) e um

contraeletrodo (fio de Al), imersos em paralelo em uma solução eletrolítica de sulfato de cobre, que se torna um condutor iônico de Cu. O eletrodo de trabalho é ligado na parte positiva da fonte de alimentação, e o contraeletrodo é ligado na parte negativa da mesma (Akbari *et al.*, 2022; Rodrigues, 2023).

Quando ocorre de a solução eletroquímica ser ácida, pode-se negligenciar a polarização do eletrodo para uma baixa densidade de corrente e tensão, pois em soluções ácidas a taxa de deposição é maior. Além disso, pelo fato dos sulfatos apresentarem uma certa acidez, não necessariamente é preciso adicionar alguma substância para aumentar a acidez da solução eletroquímica. Com isso, só o sulfato de Cu leva a película de cobre a ser mais homogênea (Akbari *et al.*, 2022).

2.1.4 Morfologia do cobre depositado através da eletrólise

Ficou claro que temperatura, tempo e tensão, são parâmetros que inferem diretamente na morfologia do material depositado. Sendo assim, durante esse processo da eletrodeposição, os íons citados anteriormente, ficam menores e por esse motivo formam uma estrutura cristalina na superfície do fio de alumínio (Akbari *et al.*, 2022; Ernest, Lyons, 1954). A espessura da camada é determinada principalmente pelas condições de eletrodeposição, ou seja, pela composição química do eletrólito, na qual podem ser adicionadas outras substâncias para melhorar a eletrodeposição (Lim *et al.*, 2016).

O óxido é um fator que aumenta a resistência elétrica dos materiais condutores (Hung, 1988; Chapman, 2016; Qing *et al.*, 2017). Akbari *et al.* (2022) relatam que com o aumento da temperatura do banho da solução eletroquímica, aumenta-se também a quantidade de óxidos, e diminui a quantidade de cobre eletrodepositado. Além do mais, as condições de superfícies úmidas, rugosas e de granulação fina reagem rapidamente com o ar logo após ao banho eletroquímico da eletrodeposição. Nessas condições, a oxidação é aumentada de maneira considerável (Akbari *et al.*, 2019; Akbari *et al.*, 2018; Akbari *et al.*, 2019).

A eletrólise feita em temperatura ambiente, forma um acúmulo de estruturas cristalinas de Cu, com vários diâmetros de sítios de nucleação e aparições de facetas planas com alguns formatos iguais e diferentes também. Desse modo, deixando em temperatura fixa de aproximadamente 22°C, o tamanho do plano é determinado pelo número de pulsos da tensão aplicada. Autores como Akbari *et al.* (2020 e 2022) relatam que aparentemente em 8 pulsos aparecem facetas em forma de tetraedro, mas também levanta a hipótese de possivelmente serem triângulos quebrados (hexaedros). Além disso,

eles observaram também na morfologia de suas amostras, estruturas cristalinas octaédricas (submicrométrico) como pirâmides octaédricas. Por conta disso, existe a necessidade de padronizar uma tensão na eletrodeposição, pois é um fator crucial que afeta bastante no formato das estruturas cristalinas da eletrólise.

2.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

2.2.1 Materiais

Fios comerciais de liga de alumínio 1350 (Al 1350) (com dimensões de 250 mm de comprimento e 2,7 mm de diâmetro), fabricados pela ACL Cables PLC (Colombo, Sri Lanka), uma placa de cobre puro. Soluções eletroforéticas foram preparadas usando: sulfato de cobre (ICO) 5H₂O PA-ACS (98% de pureza), Acetona PA, hidróxido de sódio (todos adquiridos da SYNTH, Diadema, Brasil) e água destilada (produzida no Lab. de Química da UFPA campus Abaetetuba). A tensão elétrica foi aplicada por uma fonte de tensão contínua (fonte de alimentação regulada-MPL3303M, 0–30 V, 5A do fabricante MINIPA, Joinville, Brasil), Cabos banana jacaré para fazer as medidas de resistência, além de ser usado para a montagem do circuito da eletrólise. Foi utilizado um agitador magnético modelo 752 (FISATOM, São Paulo, Brasil) com capacidade de 6 L, faixa de rotação de 120 a 1800 rpm sem aquecimento, para usar na agitação da solução eletrolítica. Para a secagem dos fios foi utilizada uma estufa de secagem microprocessada, modelo SX1.0DTMS (STERILIFER, São Caetano do Sul, Brasil), fabricada em aço inox 430, além da secagem ambiente. Além disso, foi utilizado uma proveta graduada em vidro c/base em polietileno de 1000ml e também um recipiente em forma de paralelepípedo. Por fim, um cronometro digital, para medir o tempo da eletrólise.

2.2.2 Realização da galvanoplastia

O processo de eletrólise para fazer o revestimento de cobre em fio de Al-1350 acontece inicialmente com a preparação da solução em um recipiente com capacidade de 1l, na qual, é dissolvido 400 g de sulfato de cobre (Cu SO₄) em 700ml de água destilada, como exposto na figura 1. Assim, o (CuSO₄) fica dissolvendo em água durante uma hora através de um agitador magnético que não varia sua temperatura.

Figura 1 - Solução de (CuSO_4) já dissolvido em água.

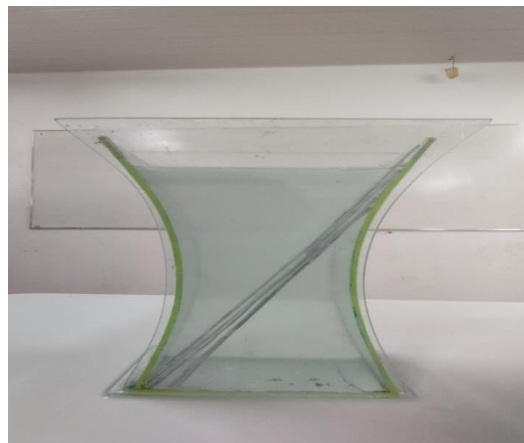


Fonte: Elaborada pelo autor.

Além disso, enquanto a solução está sendo dissolvida no agitador magnético, acontece também o processo de limpeza dos fios para reduzir ao máximo as impurezas que contêm neles (quando recebidos). Neste trabalho, foram utilizados fios da liga 1350 de Alumínio (Al), que são bastantes usados na fabricação de cabos nas linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica, pois além dessa liga ter uma capacidade alta de ampacidade, suporta também uma maior resistência a temperatura, que consequentemente tem uma maior tolerância ao efeito joule, que é uma das maiores problemáticas quando se trata de perda de energia (Cavalcante *et al.*, 2006).

Por conta disso, os fios de Al-1350 são submersos por 60 s em uma solução aquosa com 60g de hidróxido de sódio (NaOH) dissolvido em 1l de água para ocorrer um ataque químico, em razão de fazer uma limpeza profunda. Logo após esse processo os fios são lavados com acetona PA, seguidamente de água destilada para finalizar a limpeza, como é mostrado na figura 2:

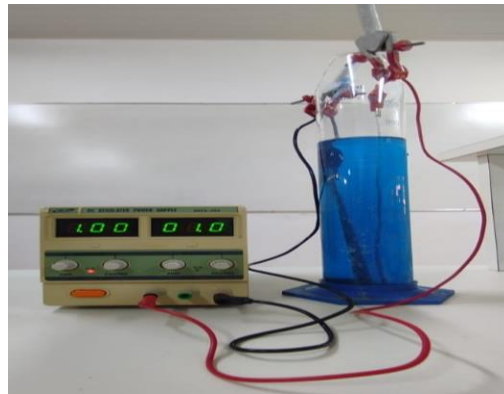
Figura 2 – Limpeza de Impurezas com (NaOH).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A deposição foi realizada com o fio de alumínio (agindo como ânodo) mergulhado em banho convencional de 800ml de sulfato de cobre (CuSO_4), que depois de agitado aparenta uma coloração azul escura e com PH de 2,26 (ácido). Além disso, foi mergulhado também uma barra de cobre (agindo como cátodo), sob tensão elétrica de 1 V, variando o tempo de 5 a 15 min para encontrar um tempo padrão a qual não deixará o revestimento rugoso, mostrado na figura 3. Em seguida, o fio é retirado e colocado para secar em temperatura ambiente e, assim é produzido o fio Al/Cu através da eletrólise.

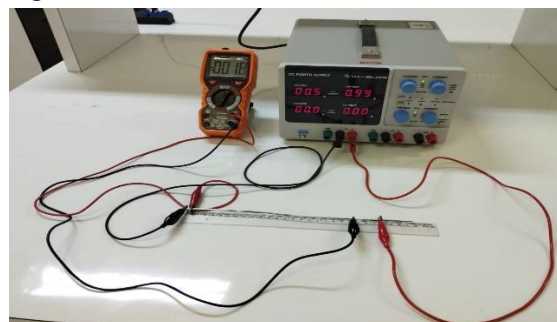
Figura 3 – Circuito de eletrodeposição montado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A caracterização morfológica do fio Al/Cu-1350 foi realizada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) utilizando um microscópio modelo VEGA3 (TESCAN, Brno, República Tcheca) em modo eletrônico secundário, com tensões de aceleração de 10 e 30 kV e distâncias de trabalho de 9,71 e 9,72 mm. A caracterização elétrica do Al/Cu-1350, foi feita em temperatura ambiente, na qual, foi realizada usando um multímetro digital MPK-2000e (MEGABRAS, São Paulo, Brasil) para medir as resistências e calcular a resistividade elétrica e condutividade elétrica do IACS seguindo a norma ASTM B3-13(2018) para calcular a condutividade e ASTM B193-20 para resistência, visto na figura 4:

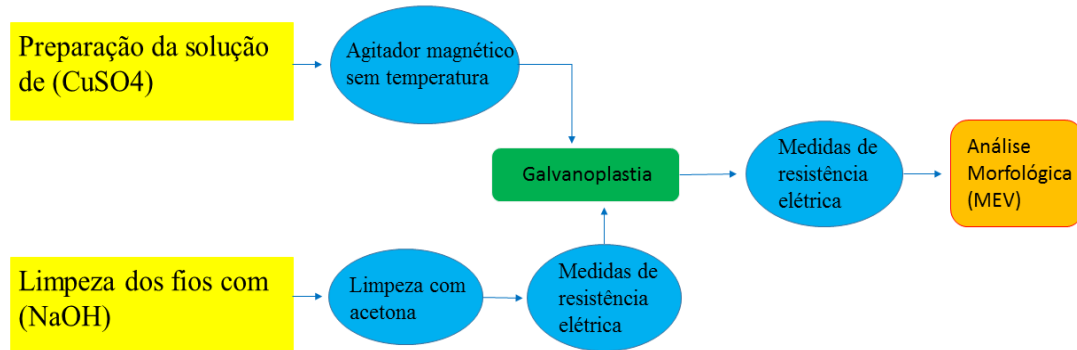
Figura 4 – método de resistividade ASTM B193-20.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Esse roteiro experimental a seguir, pode ser sintetizado no fluxograma presente na figura 5

Figura 5 – Fluxograma de Roteiro dos Procedimentos Experimentais



Fonte: Elaborado pelo Autor

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados do revestimento por meio da eletrólise obtido no fio Al/Cu-1350 são apresentados nas figuras 6 e 7 a seguir, através da análise morfológica por Microscopia de Varredura (MEV), em que foi aplicado uma corrente elétrica de 1 A por 5 e 15 min, para comprovar a morfologia em termo de comparação.

Na figura 6, mais especificamente no retângulo (a), é possível visualizar a micrografia MEV do fio com ampliação de 553x, indicando que a deposição de cobre sobre o fio de alumínio ocorreu de forma predominantemente homogênea e aderente.

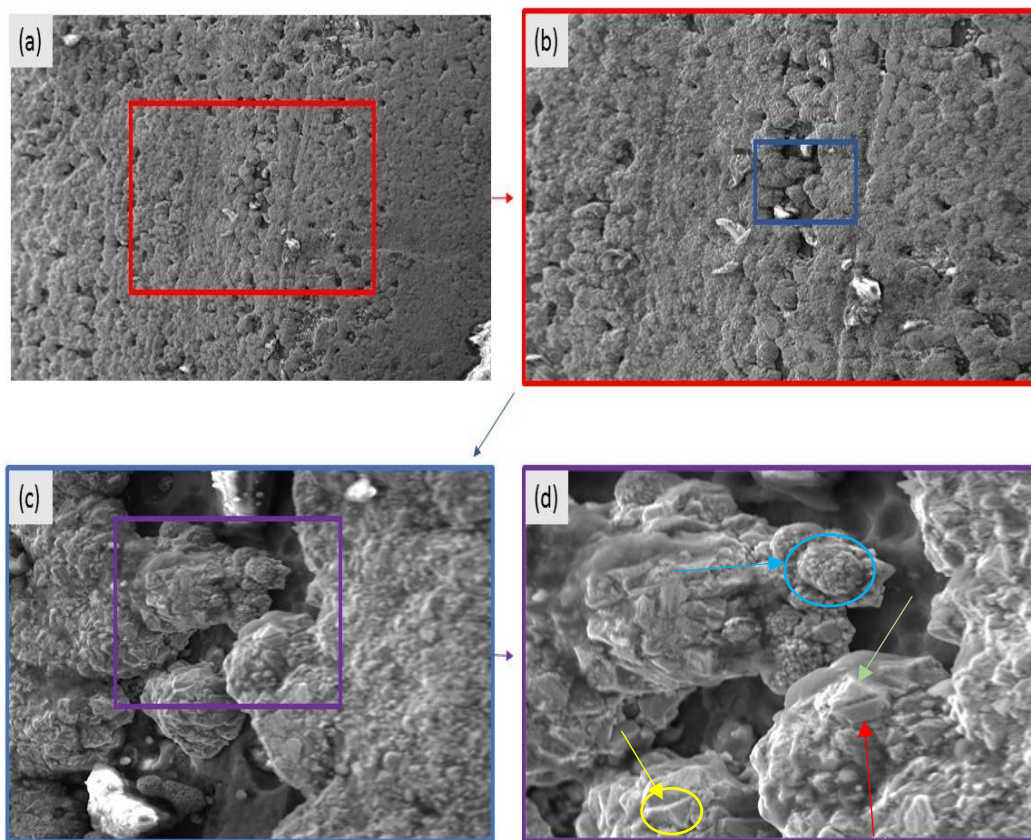
Já na micrografia MEV da Figura 6 (b), no retângulo vermelho, é mostrado uma ampliação de 1.110x na região da figura 6 (a) na qual pode-se observar melhor sobre a espessura dessa deposição, através de pequeno buraco na película de cobre sobre o fio de alumínio. Além disso, na figura 6 (c) mostra uma imagem tirada a 5.530× de ampliação em destaque no retângulo azul em relação ao retângulo vermelho, na qual observa-se que existam aparentemente algumas estruturas cristalinas de (Cu) começando a se formar na superfície do fio de Al.

Com isso, finalmente na figura 6 (d), no retângulo roxo, tem-se uma ampliação de 1.110x em relação a imagem 6 (c), onde foi possível visualizar a forma exata que estruturas cristalinas que estão sendo formadas, ou seja, é o início de uma formação que mostra vários sítios de nucleação em sua parte inicial e acoplado a eles também, pequenas estruturas cristalinas em formato triangular (seta verde), aparentemente em forma de

pirâmide (seta amarela) e retangular (seta vermelha) (Rodrigues, 2023; Mallik et al., 2014).

Essa morfologia é bastante similar quando comparado a avaliação morfológica de Mallik et al. (2014), pois como foi mostrado através da seta amarela na figura 6 (d), que ocorreu a aparição de estruturas cristalinas em formato de pirâmides tetraedro, pelo fato de ter três facetas triangulares. Com isso, pode ser observado também na morfologia, através da seta azul claro, muitos sítios de nucleação, que possivelmente pode aparecer estruturas cristalinas de forma Cúbica, pelo formato retangular da seta vermelha e pirâmides octaédricas, pelo formato triangular da seta verde, isso acontece quando as estruturas cristalinas estão na sua forma bem definidas (Sun et al., 2021; Rodrigues, 2023; Mallik et al., 2014).

Figura 6 - Morfologia da eletrólise de Cu/Al em 5 min.



Fonte: Elaborado pelo autor.

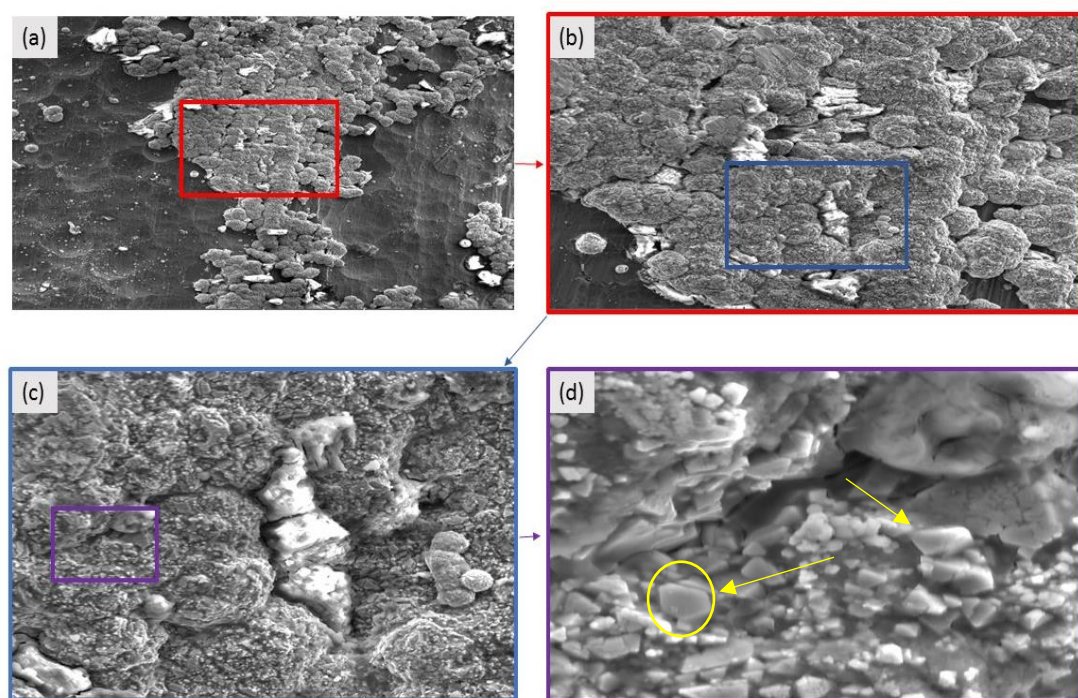
Portanto, como algo comparativo para saber se o tempo é um parâmetro que influencia diretamente a morfologia do material, realizou-se uma deposição de cobre no tempo de 15 min, em que o resultado obtido é mostrado claramente na figura 7.

Assim, No Al/Cu 15 min figura 7 (a) ampliado 554x mostra uma morfologia com falta de aderência e película rugosa de cobre no fio, assim, com essa morfologia com alta rugosidade, provoca o surgimento de óxidos na superfície, que conseqüentemente acarreta uma alta interferência na condutividade do fio de Al (Akbari et al., 2019; Akbari et al., 2018; Akbari et al., 2019).

Na figura 7 (b) com 1.380× de ampliação na região de 7 (a) destacado no retângulo vermelho revela, revela uma rugosidade bastante elevada de deposição de cobre no fio de Al. Contudo, com uma ampliação ainda maior, mais especificamente 1.850x, na região do retângulo vermelho destacado em azul, observa-se a existência de estruturas completamente equiaxial, ou seja, grãos grosseiros heterogêneos, como pequenos “grãos de areia” na superfície (Zulian et al., 2010).

Com isso, faz-se necessário usar uma ampliação de 5.540x na região de 7 (c) (retângulo azul), em que o retângulo roxo, 7 (d) apontado através da seta amarela, mostra que existem estruturas cristalinas indefinidas ou deformadas na eletrodeposição de 15min.

Figura 7 – Morfologia da eletrólise de Cu/Al em 15 min



Fonte: Elaborado pelo autor.

Aumentar o tempo de eletrodeposição, aumenta também, o número de ciclos de deposição na voltametria cíclica, ou seja, aumentando o número de pulsos (pulso-tensão),

resulta em uma deposição mais intensa e rápida, deixando a película de cobre depositada mais rugosa e com uma menor aderência (Akbari et al., 2022). Logo, aumentar o tempo de 5min (figura 6) para 15min (figura 7), foi visto claramente através do MEV o aumento da rugosidade, deixando também a morfologia das estruturas cristalinas de forma deformada, sendo possível visualizar a presença de óxidos na superfície.

Assim, Para Blodgett, Ukpabi e Nagy (2002), a perda aparente de condutividade é aumenta significativamente, pois tem ligação direta com a rugosidade superficial das amostras metálicas, assim em cada caso que a rugosidade é aumentada, a condutividade medida diminui com frequência.

Ademais, tanto na figura 6 (5min) quanto na figura 7 (15min), foram feitas seis medidas de resistência elétrica através da norma ASTM B193-20, logo após, foi tirada uma média dos resultados. Além disso, as medidas elétricas foram feitas em temperatura ambiente, na qual obteve-se resultados da figura 6 que mostraram uma diminuição na resistência elétrica de aproximadamente 7% com relação ao condutor padrão de alumínio. Já na figura 7, a resistência elétrica aumentou de maneira considerável em relação ao condutor de Al tradicional.

Contudo, obtendo os valores das resistências elétrica e sabendo que área do fio é calculada através da equação 1:

$$(1) \quad A = \frac{\pi d^2}{4}$$

Na qual, $d = 2,7 \text{ mm} = 0,0027 \text{ m}$ e fazendo a substituição dos valores foi possível encontrar:

$$(1.1) \quad A = 5,72 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

Com isso, sabendo também que o comprimento do fio utilizado foi de 200 mm, que é ao equivalente a 0,2 m. Foi possível fazer o cálculo da resistividade (ρ) do material através da segunda lei de ohm (equação 2), antes (Al-padrão) e depois (Al-cobre) da eletrodeposição.

$$(2) \quad R = \frac{\rho L}{A} \rightarrow \rho = \frac{RA}{L}$$

Sendo assim, com todos os dados disponíveis e utilizando a resistência do Al-padrão, na qual a resistência é $R = 0,99 \text{ m}\Omega = 0,00099 \text{ }\Omega$ e realizado a substituição de em (2), obteve-se:

$$(2.1) \quad \rho = 2,83 \times 10^{-8} \text{ }\Omega/\text{m}$$

Com isso, sabendo que a condutividade (σ) é o inverso da resistividade, será possível utilizar a equação 3 a seguir:

$$(3) \quad \sigma = \frac{1}{\rho}$$

Logo;

$$(3.1) \quad \sigma = 0,3534 \times 10^8$$

Com tudo isso, para calcular o IACS do Al-padrão, faz-se necessário realizar uma regra de três tomando como parâmetro a condutividade do cobre que é de 58×10^6 , na qual tem ao equivalente a 100% do IACS. Como é mostrado a seguir na equação 4:

$$(4) \quad \begin{array}{ccc} 58 \times 10^6 & \text{---} & 100 \% \\ & x & \\ \sigma & \text{---} & x \% \end{array}$$

Substituindo (3.1) em (4), foi possível calcular que o IACS do Al-padrão é $x = 60,93\%$. Com isso, realizando os mesmos cálculos, foi possível obter dados da resistividade, condutividade e IACS dos fios antes e depois da eletrodeposição representados na tabela 1 a seguir;

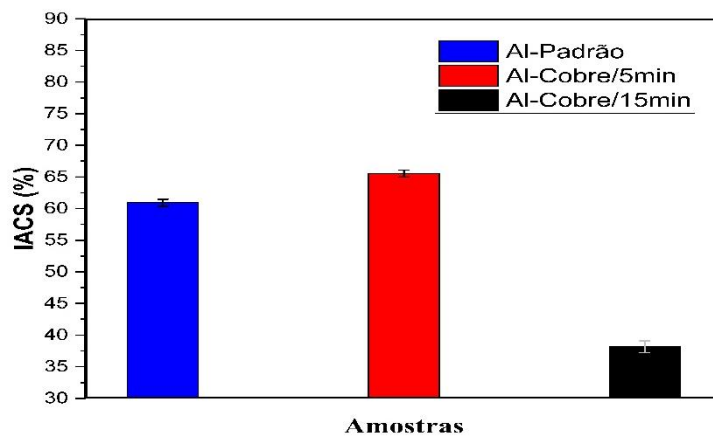
Tabela 1 – Resultados dos cálculos de resistividade, condutividade e IACS dos fios

Nomenclaturas	Al-padrão	Al-cobre 5min	Al- cobre 15min
IACS (%)	$60,93 \pm 0,56$	$65,55 \pm 0,54$	$38,14 \pm 0,96$
$\rho \text{ (}\Omega/\text{m)}$	$2,83 \times 10^{-8}$	$2,63 \times 10^{-8}$	$4,52 \times 10^{-8}$
σ	0,3534	0,3802	0,2212

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para deixar ainda mais claro visualmente sobre a disparidade do IACS dos fios, foi organizado em um gráfico de barras esses valores (figura 8), em que mostra que não basta apenas depositar o cobre no fio, mas é necessário utilizar parâmetros mais adequados que resulte em morfologias favoráveis.

Figura 8 – Gráfico dos valores de IACS



Fonte: Elaborado pelo autor.

CONCLUSÃO

Com tudo que foi exposto, foram realizados vários testes de tensão também, pois o número de pulsos afeta diretamente na morfologia da deposição. Na qual, a tensão de 1v foi a mais adequada para deixar a película de cobre menos rugosa e mais aderente. No entanto, o tempo também está diretamente ligado com a morfologia quando se trata de aderência e rugosidade.

Por conta disso, foi necessário encontrar parâmetros que conciliem tanto o tempo quanto tensão da eletrodeposição. A rugosidade da superfície, a espessura do filme e o tamanho do grão podem ser controlados pelo tempo de deposição durante a eletrodeposição (Kassim et al., 2010).

Assim, de maneira lógica, como a informação de que a tensão de 1v adequadamente nesse processo foi descoberta experimentalmente como boa, foi possível fazer a eletrodeposição deixando a tensão fixa e variando tempo. Então, comprovou-se que de fato, a eletrodeposição pode ser usada para controlar a rugosidade e a morfologia da superfície ajudando no desenvolvimento de novos materiais nanoestruturados com boas propriedades mecânicas e elétricas (Akbari et al., 2022).

Desse modo, conclui-se que o processo de cobreamento é bastante eficaz através do processo de eletrodeposição. No entanto, o processo deve ser feito da forma correta, ou seja, precisa-se observar algumas coisas que eletrodeposição causa no material e adotar parâmetros para não ocorrer a obter de rugosidade (que causa aumento da resistência elétrica), falta aderência e outros.

Para trabalhos futuros, pretende-se adotar novos parâmetros que possam diminuir ainda mais a resistência elétrica do fio de Al tradicional, testando novos parâmetros como adição de novos aditivos na solução que melhoram na eletrodeposição segundo a literatura, assim, poderá diminuir ainda mais essa resistência elétrica através do fio de Al. Além disso, como se trata de elaborar experimentalmente um material condutor nano estruturado, será adicionado também, nanotubo de carbono, ou seja, revestidos de Cu/NTC. Na qual, o nanotubo de carbono entra como aliado para ajudar ainda mais nessa condutividade elétrica, por ele ser também, um material condutor.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Relatório—Perdas de Energia na Distribuição—1/2021; Agência Nacional de Energia Elétrica: Brasília, Brazil, 2021. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/documents/654800/18766993/Relat%C3%B3rio+Perdas+de+Energia_+Edi%C3%A7%C3%A3o+1-2021.pdf/143904c4-3e1d-a4d6-c6f0-94af77bac02a> Acesso em: 17 nov. 2023.
- AKBARI, R. et al. Intrinsically Water-Repellent Copper Oxide Surfaces; An Electro Crystallization Approach. **Appl. Surf. Sci.** 443, 191–197, 2018.
- AKBARI, R. et al. Hydrophobic Cu₂ O Surfaces Prepared by Chemical Bath Deposition Method. **Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.** 125, 190, 2019.
- AKBARI, R. et al. The Influence of Bath Temperature on the One-Step Electrodeposition of Non-Wetting Copper Oxide Coatings. **Appl. Surf. Sci.** 503, 144094, 2020.
- AKBARI, R. et al. Controlling Morphology and Wettability of Intrinsically Superhydrophobic Copper-Based Surfaces by Electrodeposition. **Coatings** 2022, 12, 1260, Departamento de Ciência de Materiais, Universidade de Milano-Bicocca, Via R. Cozzi 55, 20125 Milão/Itália, 29 de agosto de 2022.
- American Society for Testing and Materials. B3-13: Standard specification for soft or annealed copper wire; **American Society Testing and Materials**: West Conshohocken, PA, USA, 2018.
- American Society for Testing and Materials. B193-20: Standard Test Method for Resistivity of Electrical Conductive Materials: **American Society Testing and Materials Institute**: West Conshohocken, PA, USA, 2020.
- BLODGETT, M. P.; UKPABI, C. V.; NAGY P. B. Surface Roughness Influence on Eddy Current Electrical Conductivity Measurements. **Materials Evaluation**. June 2003.
- CAVALCANTE, F. A. J. et al. Avaliação Mecânica e Elétrica de Ligas al-fe-zr para Fins Elétricos após Envelhecimento Natural de 18 meses. **Engevista**, v. 8, n. 2, p. 69-76, dezembro 2006.
- CÂMARA E. C. B. **Estudo do comportamento à fadiga de cabos condutores de energia com alma de alumínio utilizando redes neurais artificiais**. 2020. 105f. Tese (de Doutorado). Universidade federal do rio grande do norte, centro de tecnologia programa de pós-graduação em engenharia mecânica, Natal, 2020.
- CHAPMAN, D.; High conductivity copper for electrical engineering. **Publicação nº 122 da Copper Development Association e nº Cu0232 do European Copper Institute**. Reino Unido, fevereiro de 2016.

DOWLING, N. E. Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue. **Pearson Education**; 4th Edition ed. New Jersey, 2013.

ERNEST, H.; LYONS, JR. Electronic Configuration in Electrodeposition from Aqueous Solutions: The Effect of Ionic Structures. **Journal of the electrochemical society**. Vol. 101, No. 7, Illinois, July 1954.

FREITAS, E. S. et al. Caracterização Térmica, Mecânica e Elétrica da Liga Al-0,6%Mg-0,8%Si Refinada e Modificada com Diferentes Teores de Cobre. **the 8 Thlatin-american congress on electricity generation and transmission – clagtee**. Universidade Federal do Pará, Belém-Pa, 2009.

GAMBONI, O. C. et al. Effect of Salt-water Fog on Fatigue Crack Nucleation of Al and Al-Li Alloys. **Materials Research** ; 17(1): 250-254, Department of Materials Engineering, University of São Paulo – USP, Av. Trabalhador São Carlense, 400, CEP 13566-590, São Carlos, SP, Brazil, 2014.

HUNG, A. Electroless Copper Deposition With Hypophosphite as Reducing Agent. **plating and surface finishing**, China, Janeiro de 1988.

JACK, W.; SNYDER, D. **Modern electroplating**: Electrodeposition of copper. ECS (Electrochemical Society Series) WELEY, fifth edition, New Jersey-EUA, 2010.

KALOMBO, R. B. et al. “Comparative Fatigue Resistance of Overhead Conductors Made of Aluminium and Aluminium Alloy: Tests and Analysis,”. **Procedia Engineering**, v.133, pp. 223-232, 2015.

KASSIM, A. et al. Influence of the deposition time on the structure and morphology of the zns thinfilms electrodeposited on indium tin oxide substrates. **Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures**. Vol.5, No 4, October-December 2010, p. 975-980.

KREISLOVA, K., JAGLOVA, M., TUREK, L., et al. “Evaluation of corrosion of long-term exposed aluminium conductor”, **Hodnocení korozního napadení hliníkových vodičů po dlouhodobé expozici**. v. 57, n. 1, 1, pp. 25-34. Março, 2013.

LEPAK-KUC, S., BONCEL, S., SZYBOWICZ, M., et al.,2018, “The operational window of carbon nanotube electrical wires treated with strong acids and oxidants”, **Scientific Reports**, v. 8, pp. 14332.

LI, M.; ZINKLE, S. J. Propriedades físicas e mecânicas do cobre e ligas de cobre. **Elsevier, In: Konings RJM, (ed.) Comprehensive Nuclear Materials**, Amsterdã, v. 4, p. 667-690, 2012.

LIM, S. et al. Electrochemical Deposition of Copper on Polymer Fibers. **J. Electrochem. Sci. Technol.**, 7(2), 132-138, Korea, 2016.

MALLIK, M. et al. Effect of Current Density on the Nucleation and Growth of Crystal Facets during Pulse Electrodeposition of Sn–Cu Lead-Free Solder. **Cryst. Growth Des.** 14, 6542–6549, 2014.

MOHTAR, S. N.; JAMAL, N.; SULAIMAN, M. "Análise de todos os condutores de alumínio (AAC) e todos os condutores de liga de alumínio (AAAC)", **Conferência TENCON** da Região 10 do IEEE de 2004, Chiang Mai, Tailândia, 2004, pp. 412 Vol. 3, doi: 10.1109/TENCON.2004.1414794, 2004.

NASCIMENTO, D. F.L. et al. Low Cycle Fatigue Behavior of Al-Mg-Si Alloys Extruded Parts. **Materials Research**. 2022; 25; DOI: <https://doi.org/10.1590/1980-5373>, SP, Brasil, Mar-2022.

PAPAGEORGIOU, D.G., LI, Z.; LIU, M., KINLOCH, I.A., et al., 2020, "Mechanisms of mechanical reinforcement by graphene and carbon nanotubes in polymer nanocomposites", **Nanoscale**, v. 12, issue 4, pp. 2228-2267.

PARK, M., LEE D.-M., PARK, M., et al., 2021, "Performance enhancement of graphene Assisted CNT/Cu composites for lightweight electrical cables", **Carbon**, v. 179, pp. 53-59.

QING, Y. et al. Rough structure of electrodeposition as a template for on ultrarobust self – cleaning surface. *ACS (Applied materials e interface)*, 16571-16580, 9, China, 2017.

RODRIGUES, F. **Eletrodeposição e caracterização de revestimento de cobre/nanotubos de carbono dopados com iodo em fios de alumínio liga 1350**. 2023. 79f. Tese (de Doutorado). Universidade Federal do Pará (UFPA), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, PRODERNA/ITEC, Belém- PA, outubro de 2023.

RODRIGUES, F. et al. Propriedades elétricas de fios de alumínio revestidos de Cu/f-CNT dopados com iodo por eletroforese com solução de sulfato de cobre. **Metais** 2022, 12, 787. <https://doi.org/10.3390/met12050787>. Maio-2022.

RYEN, Ø. et al. Strengthening Mechanisms in Solid Solution Aluminum Alloys. **Metallurgical and materials transactions A**, VOL. 37A, JUNE 2006—1999.

SCHMIDT, C. A. J.; LIMA, M. A. M. A Demanda por Energia Elétrica no Brasil. **RBE (revista brasileira de economia)**, Scielo, Brasil, Rio de Janeiro 58(1):67-98 JAN/MAR 2004.

SILVA, M. V. S. et al. CORROSÃO DO AÇO-CARBONO: UMA ABORDAGEM DO COTIDIANO NO ENSINO DE QUÍMICA. **Quim. Nova**, Vol. 38, No. 2, 293-296, SP-Brasil, 2015.

SUN, Y.; SUN, C. Y.; CHEN, Z. X. et al. Morphology control of Cu and Cu₂O through electrodeposition on conducting polymer electrodes". v. 8, n. 6, pp. 1449–1454, 2021.

TOIROV, O.; ALIMKHODJAEV K.; PARDABOEV A. Analysis and ways of reducing electricity losses in the electric power systems of industrial enterprises. **E3S Web of Conferences** 288, 01085 (2021) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128801085> SUSE-2021.

VIEIRA, E. R. et al. Análise comparativa da resistência à fadiga por fretting entre os cabos condutores feitos de liga de alumínio 900 MCM e 823 MCM). **Revista Matéria**, v.26, n.1, Universidade de Brasília, Laboratório de Engenharia Mecânica, SG 09, Asa Norte, Brasília, Distrito Federal, 2021.

ZULIAN, F. D. Z. et al. Correlação entre propriedades mecânicas e características macroestruturais em ligas de Al-Cu. **Revista Thema**. 07 (01), 2010.