

ESTUDO DA LIGA DE CU-ZN E SEUS ÓXIDOS UTILIZANDO A TÉCNICA DE ELIPSOMETRIA ESPECTROSCÓPICA*

Cláudio Faria Lopes Junior¹
Glauco Silva de Assis Machado²
Patrícia Sousa Nilo Mendes²
Priscila Sousa Nilo Mendes³
José Augusto Oliveira Huguenin⁴
Elivelton Alves Ferreira⁵
Ladário da Silva⁶

Resumo

Este trabalho teve como objetivo caracterizar a superfície da liga de Cu-Zn e seus óxidos sob o efeito da exposição das amostras à atmosfera gasosa num ambiente controlado com 40% de umidade e a uma temperatura de aproximadamente 23°C. Utilizou-se a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura com Espectroscopia de Dispersão de Energia para acessar a composição dos elementos da liga. Posteriormente, a técnica de Microscopia Confocal para analisar a topografia das amostras e medir a rugosidade superficial do material, com base na norma DIN 4768 / ISO 4288. Além disso, foi utilizado a Elipsometria Espectroscópica, uma técnica de análise óptica capaz de medir propriedades ópticas como o índice de refração e coeficiente de extinção em função do comprimento de onda na faixa 250 nm a 1000 nm, e espessuras dos filmes finos de óxidos formados sobre o material.

Palavras-chave: Caracterização; Elipsometria; Liga de Cu-Zn; Óxidos; Filmes Finos.

STUDY FOR CHARACTERIZATION OF THE CU-ZN ALLOY AND ITS OXIDES USING THE SPECTROSCOPIC ELIPSOMETRY TECHNIQUE

Abstract

This work aimed to characterize the surface of the Cu-Zn alloy and its oxides under the effect of the exposing samples to the gaseous atmosphere in a controlled environment with 40% humidity and at a temperature of approximately 23°C. The Scanning Electron Microscopy technique with Energy Dispersion Spectroscopy was used to access the composition of the alloy elements. Afterwards, the Confocal Microscopy technique was used to analyze the topography of the samples and to measure the surface roughness of the material, based on DIN 4768 / ISO 4288. In addition, Spectroscopic Ellipsometry, a technique of optical analysis capable of measuring optical properties, the refractive index and extinction coefficient being a function of the wavelength in the range 250 nm to 1000 nm, and thin film thicknesses of oxides formed on the material.

Keywords: Characterization, Ellipsometry, Cu-Zn alloy; oxides; Thin films.

¹ Engenheiro Mecânico, Mestrando em Engenharia Metalúrgica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica (PPGEM), Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda (EEIMVR), Universidade Federal Fluminense (UFF), Volta Redonda, RJ – Brasil.

² Engenheiro Metalúrgico, Mestrando em Engenharia Metalúrgica, PPGEM, EEIMVR, UFF, Volta Redonda, RJ - Brasil.

³ Engenheira Metalúrgica, Doutoranda em Engenharia Metalúrgica, PPGEM, EEIMVR, UFF, Volta Redonda, RJ - Brasil.

⁴ Físico, Doutor em Física, Professor, ICEx, UFF, Volta Redonda, RJ – Brasil.

⁵ Químico, Doutor em Ciências, Professor, ICEx, UFF, Volta Redonda, RJ - Brasil.

⁶ Físico, Doutor em Ciências Físicas, Professor, ICEx, UFF, Volta Redonda, RJ – Brasil..

1 INTRODUÇÃO

O cobre e suas ligas são considerados como um dos primeiros metais a serem descobertos pela humanidade. Estima-se que seu uso date de 5000-7000 anos antes do presente momento. Desta forma, há uma longa história da metalurgia do cobre desde então. Atualmente este metal puro e suas ligas são consideradas a terceira matéria-prima mais utilizada na indústria em geral, sendo superado apenas pelo aço e pelo alumínio [1].

Os latões são desde muito tempo o grupo mais utilizado entre as ligas de cobre em diversos segmentos da tecnologia pelos seus benefícios incomparáveis, como existência sob a forma de folhas, barras, tubos, perfis ou fios. Este material possui um conjunto surpreendente de propriedades e características, incluindo uma boa condutividade térmica e elétrica, boa resistência ao choque e boa resistência a corrosão, alta maleabilidade e resistência mecânica, resistência ao uso e a degradação por radiação solar. Além do fato deste material poder sofrer tratamentos térmicos e superficiais, como a cromagem ou a niquelagem, o uso de vernizes e recobrimento polimérico. Assim estas propriedades, aliadas a sua facilidade de deformação a quente e a frio, o tornam bastantes atrativos para suprir as necessidades da sociedade [2].

Além das propriedades mecânicas e metalúrgicas do latão, este possui uma importância industrial e valor competitivo no mercado, já que estes são adaptados perfeitamente para a fabricação de numerosos elementos destinados para a indústria. Este material pode ser produzido variando efetivamente sua concentração de cobre e zinco, e conseqüentemente, variando também seu custo e suas propriedades. Isto se deve também ao fato deste tipo de liga possuir uma grande variedade de formas e dimensões de seus produtos semi-acabados, assim os custos de produção serão reduzidos pela obtenção rápida das peças prontas [3].

Comumente falhas e problemas enfrentados pela sociedade em relação aos materiais são devidos as suas superfícies e propriedades de superfície, especialmente quando se lida com oxidação e corrosão de metais. O latão tem boas propriedades de resistência à corrosão, ocasionando uma ampla aplicação do mesmo em meios agressivos que podem propiciar este tipo de fenômeno, os quais em menor ou maior grau provocam deterioração de suas propriedades mecânicas, físicas e até mesmo ópticas. Assim, o emprego de avançadas técnicas de

caracterização é, portanto, muito importante para o estudo e domínio tanto dos materiais, quanto dos fenômenos que podem influenciar em suas propriedades e características [4] [5].

A técnica de elipsometria consiste em um método de análise de propriedades ópticas de um material. Pois, trata-se de um ensaio normalmente não destrutivo, que avalia as mudanças no estado de polarização da luz incidente, mudança essa gerada pela reflexão ou transmissão na superfície da amostra analisada [6]. Esta técnica pode ser aplicada na caracterização de diversos materiais e experimentos, assim como medir as propriedades ópticas como índice de refração e coeficiente de extinção, também analisa a espessura de substratos e de filmes finos de óxidos e óleos em superfícies, materiais vítreos, entre outras aplicações [7].

Entretanto, como qualquer técnica possui algumas restrições, sendo estas de que o fato da elipsometria ser uma técnica muito sensível e precisa, faz com que haja a necessidade da superfície do material ser a mais plana possível, evitando quaisquer riscos que possam aumentar a rugosidade da amostra a ser analisada [8]. Desta forma, a técnica de microscopia confocal é de extrema importância quando o intuito é medir de forma confiável e precisa, as topografias e rugosidades superficiais em escalas milimétricas a nanométricas, atendendo a necessidade da restrição causada pela elipsometria [9].

Visto que a elipsometria não se trata de uma técnica direta, é preciso realizar a modelagem dos dados obtidos por medidas experimentais, a fim de avaliar as constantes ópticas e espessuras dos filmes diante do substrato. Esta análise das medidas dos parâmetros elipsométricos é feita usualmente via construção de modelos matemáticos ópticos e adaptação do modelo computacional ao espectro medido, através de ajustes [10]. Isto resulta em outra restrição à técnica, pois o material a ser medido deve ser conhecido, ou seja, os elementos presentes na liga devem ser previamente levantados para auxílio da modelagem dos dados. Assim a técnica de microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia de dispersão de energia é necessária, pois permite aos usuários a identificação da composição química dos elementos presentes em suas amostras, realizando a medição em pontos específicos da imagem coletada por meio do microscópio para possibilitar a discussão e a correlação dessas medidas de concentrações com outros resultados pertinentes de outras técnicas [11].

Portanto, o trabalho em questão teve como objetivo geral a caracterização da liga de Cu-Zn e seus óxidos. Utilizando as técnicas de Microscopia Eletrônica de Varredura com Espectroscopia por Dispersão de Energia, Microscopia Confocal e Elipsometria, pode-se chegar aos objetivos específicos que analisaram a composição química da liga de Cu-Zn por meio da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura com Espectroscopia por Dispersão de Energia, promoveram o crescimento da espessura dos filmes finos de óxidos na liga por meio de exposição à atmosfera gasosa em ambiente controlado, examinaram a topografia e mediram a rugosidade superficial do material utilizando Microscopia Confocal, e por fim, obtiveram a espessura dos filmes finos criados no material, além das propriedades ópticas como os índices de refração (n) e coeficiente de extinção (k) do material por meio da técnica de Elipsometria.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Material

O material de estudo do presente trabalho é uma liga de cobre e zinco a qual possuía a dimensão de uma barra cilíndrica bruta com diâmetro de 25 mm e comprimento de 75 mm, assim para o desenvolvimento da caracterização e análise do material, esta barra foi cortada em 05 amostras de dimensões menores, com 25 mm de diâmetro e 15 mm de comprimento.

2.2 Preparação Metalográfica

As etapas de preparação metalográfica das amostras foram realizadas no Laboratório de Microscopia e Preparação de Amostras da Universidade Federal Fluminense – UFF com base na Norma ASTM E3-95 [12], sendo que constituíram primeiramente pela etapa de embutimento, seguido de lixamento e polimento metalográfico, até que as amostras do material fiquem com a superfície totalmente plana e com aspecto espelhado, levando em consideração que a técnica de Elipsometria necessita dessas características por ser extremamente sensível.

2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura com Espectroscopia por Dispersão de Energia

As amostras da liga de Cu-Zn foram submetidas a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura com Espectroscopia por Dispersão de Energia (MEV-EDS)

no Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica – LMME, da Universidade Federal Fluminense – UFF, conforme a Figura 1. Sendo esta uma técnica não destrutiva que possibilita a caracterização da composição química do material e seus compostos, utilizando equipamento da marca ZEISS, modelo EVO MA 10.

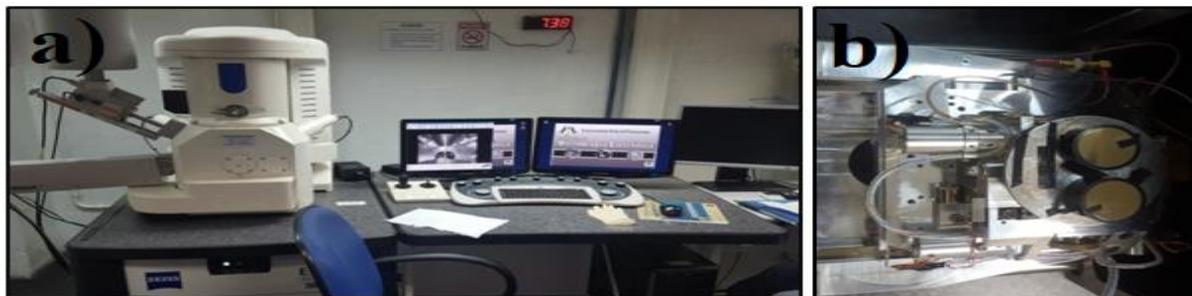


Figura 1. MEV-EDS. a) Panorama do equipamento. b) Visão da amostra.

A técnica foi realizada seguindo um procedimento de varredura para levantamento dos compostos presentes na liga, no qual foram examinadas 05 amostras da liga de cobre e zinco, medindo 04 pontos aleatórios na matriz do material, além da varredura no decorrer da imagem gerada pelo equipamento, traçando 02 linhas próximo ao centro, as quais são medidas cerca de 1035 pontos em cada uma delas, gerando resultados da composição dos elementos em cada um dos pontos, assim garantindo uma análise confiável dos elementos presentes.

2.4 Microscopia Confocal

A técnica de Microscopia Confocal foi empregada utilizando um Microscópio Confocal Interferométrico Leica DCM3D do Laboratório do Instituto de Ciências Exatas (ICEX) da Universidade Federal Fluminense - UFF, mostrado na Figura 2. Este sistema foi concebido para avaliação rápida e não invasiva de micro e nano estruturas de superfícies, em várias configurações, sendo que o mesmo combina tecnologia confocal e interferometria para medições em alta velocidade e alta resolução até 0,1 nm.



Figura 2. Microscopia Confocal. a) Panorama do equipamento. b) Visão da amostra.

Assim, a configuração do mesmo foi determinada com base na Norma DIN 4768 / ISO 4288 [13], onde é selecionada a lente com aumento de 10X e LED da cor azul, assim possibilita analisar superfícies rugosas e com texturas de acordo com o comprimento de amostragem de rugosidade especificado pela norma. As medições geraram dados de topografia em 3D do material, além da rugosidade superficial de cada uma das amostras. Sendo que as medições foram realizadas logo após a preparação metalográfica e diariamente acompanhando o crescimento natural de óxido na liga de Cu-Zn por exposição à atmosfera gasosa, em ambiente controlado com umidade de 40% e temperatura de 23 °C.

2.5 Elipsometria Espectroscópica

A Elipsometria sendo uma técnica que mede as mudanças no estado de polarização da luz após a reflexão de uma superfície foi empregada por meio de um Elipsômetro Espectroscópico modelo GES 5S da SEMILAB, equipamento situado no Laboratório Multiusuário de Caracterização de Materiais, do Instituto de Ciências Exatas da UFF, conforme Figura 3. O qual possui polarizador rotativo com *microspot* de lente convergente, e como fonte de luz uma lâmpada de Xenônio. Assim, este equipamento permite a realização de medidas fotométricas, tanto de reflectância como de transmitância, além de possibilitar medidas de propriedades dielétricas, ópticas e de espessuras de filmes finos presentes no material em análise.



Figura 3. Elipsometria Espectroscópica. a) Panorama do equipamento. b) Visão da amostra.

Este Elipsômetro em particular permite realizar as medidas experimentais em vários ângulos de incidência, porém por meio de testes e com base em pesquisas bibliográficas previamente realizadas, foi constatado que o melhor ângulo para medição dos parâmetros elipsométricos Ψ e Δ da liga de Cu-Zn foi o de 75°. As medidas foram realizadas logo após a preparação metalográfica e diariamente acompanhando o crescimento natural de óxido na liga de Cu-Zn por exposição à atmosfera gasosa, em ambiente controlado com umidade de 40 % e temperatura de 23 °C.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Microscopia Eletrônica de Varredura com Espectroscopia por Dispersão de Energia

O resultado obtido por meio da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura com Espectroscopia por Dispersão de energia (MEV-EDS) com base no procedimento descrito e após o cálculo da média dos pontos medidos pelo equipamento foi possível concluir que a liga de cobre e zinco possui uma concentração de cobre de 70% e de zinco de 30%, como mostra a Figura 4.

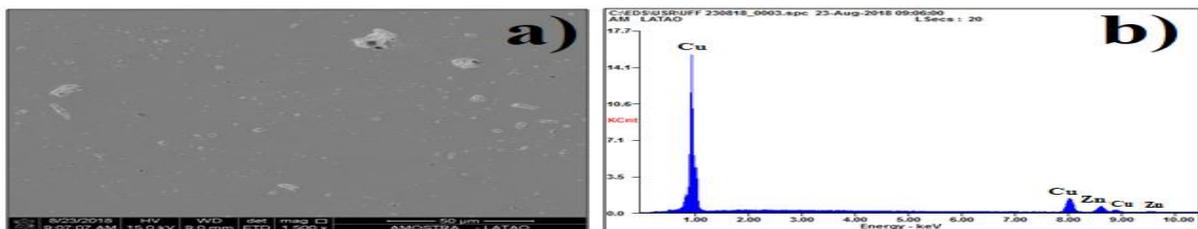


Figura 4. MEV-EDS. a) Imagem gerada da liga. b) Espectro gerado da liga.

3.2 Microscopia Confocal

Logo após o processo de preparação metalográfica das amostras da liga de cobre e zinco, estas foram submetidas à técnica de Microscopia confocal, cuja finalidade foi de examinar sua superfície utilizando análise topográfica, além de conferir se as amostras possuíam algum tipo de irregularidade, por meio da análise de rugosidade. Assim, a Figura 5 mostra respectivamente a imagem microscópicas em 2D, a topografia de superfície em 3D e o perfil de rugosidade do material ao longo da área central da amostra 1, sendo esta representativa das demais.

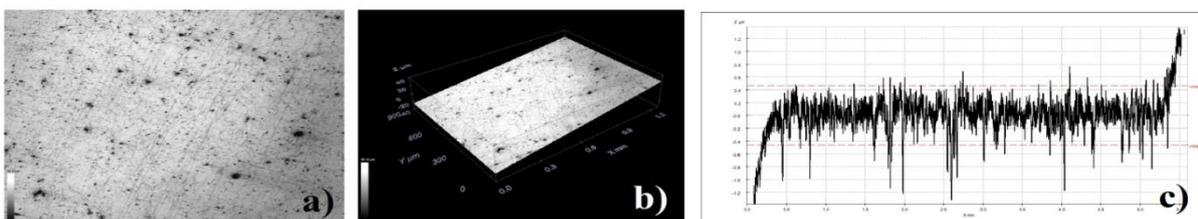


Figura 5. Amostra pura. a) Microscopia em 2D. b) Topografia de superfície em 3D. c) Perfil de rugosidade.

Por meio dos resultados alcançados pela técnica de Microscopia Confocal, é notável que as amostras possuem uma superfície plana e livre de irregularidades ou riscos profundos. A tabela 1 mostra as medidas de rugosidade média com base na Norma DIN 4768 / ISO 4288, além do desvio padrão de cada uma das amostras ao longo da linha central.

Tabela1. Medidas de rugosidade da liga de cobre e zinco pura

Amostras	Rugosidade Média – Ra (μm)	Desvio Padrão
Amostra 01.	0,2354	0,00796
Amostra 02.	0,1954	0,01092
Amostra 03.	0,2484	0,01587
Amostra 04.	0,1548	0,00926
Amostra 05.	0,1702	0,00847

Nota-se que cada uma das amostras da liga de cobre e zinco alcançou um resultado de rugosidade bem próximo quando comparadas uma com as outras, e conseqüentemente um desvio padrão muito baixo. Assim, considera-se que as medidas experimentais elipsométricas não disponham de grandes variações decorrentes de interferências que uma superfície rugosa poderia ocasionar, levando em consideração que a técnica é muito precisa e sensível.

A análise do crescimento de óxido naturalmente por exposição da liga à atmosfera gasosa em ambiente controlado também se gerou resultados de topografia de superfície e rugosidade. Sendo estes comparados de uma amostra da liga variando o tempo de exposição para acompanhamento de seu comportamento sem nenhum fator externo que poderia influenciar ou modificar seu aspecto natural. A figura 6 mostra os resultados de imagem microscópica em 2D, topografia de superfície em 3D e o perfil de uma linha da superfície usada na medida de rugosidade do material ao longo da área central da amostra de acordo com seu tempo de exposição, sendo esta representativa das demais.

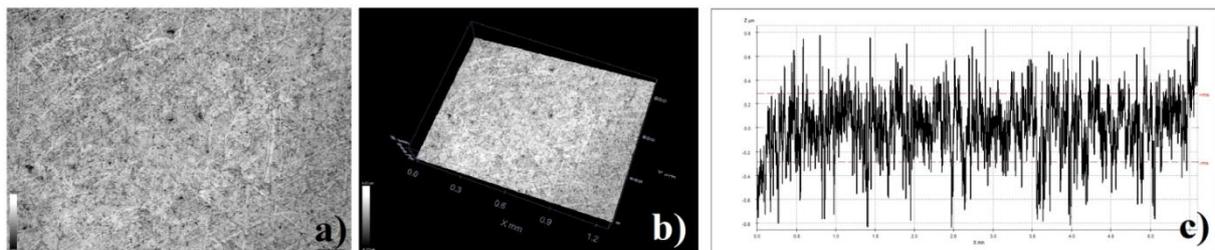


Figura 5. Amostra com exposição de 29 dias. a) Microscopia em 2D. b) Topografia de superfície em 3D. c) Perfil de rugosidade.

Através dos resultados obtidos, nota-se que o aspecto das imagens microscópicas em 2D e da topografia em 3D obtiveram mudanças no decorrer do crescimento natural de óxido, deixando a superfície mais escurificada de acordo com que o tempo de exposição aumenta, levando em consideração que os óxidos de cobre e zinco são de tons mais escuros comparados ao próprio material puro.

A tabela 2 mostra as medidas de rugosidade média com base na Norma DIN 4768 / ISO 4288 e o desvio padrão da amostra ao longo da linha central, pelo

acompanhamento realizado diariamente da liga de cobre e zinco dentre um intervalo de 1 a 29 dias, sendo este o tempo em que as medidas se estabilizaram e não ocorreram maiores variações entre as mesmas. Durante este intervalo de crescimento de óxido natural, a rugosidade média se manteve baixa apesar das pequenas oscilações que ocorreram, e o desvio padrão de cada dia de exposição foi mínimo e sem grandes discrepâncias.

Tabela2. Medidas de rugosidade da liga de cobre e zinco com óxidos crescidos naturalmente

Tempo de Exposição	Rugosidade Média – Ra (μm)	Desvio Padrão
1 dia.	0,2148	0,00517
7 dias.	0,2080	0,00510
14 dias.	0,2294	0,00940
21 dias.	0,3506	0,01670
29 dias.	0,2222	0,00867

3.3 Elipsometria Espectroscópica

As amostras da liga de cobre e zinco pura quando foram analisadas mediante a técnica de elipsometria, obtiveram-se os parâmetros elipsométricos conhecidos como Ψ e Δ . Sendo que por meio dos dados experimentais em comparação com os modelos teóricos implementados por meio da computação, notou-se uma boa concordância entre os ajustes das curvas de $\tan \Psi$ e o $\cos \Delta$ em função do comprimento de onda para cada uma das amostras, assim como mostra a Figura 6, sendo esta representativa das demais. Onde as curvas mais espessas com tons escuros mostram cinco medidas experimentais para cada uma das amostras, fornecendo maior confiabilidade e evitando possíveis erros, e a curva mais fina na tonalidade de azul claro, descreve o modelo teórico gerado.

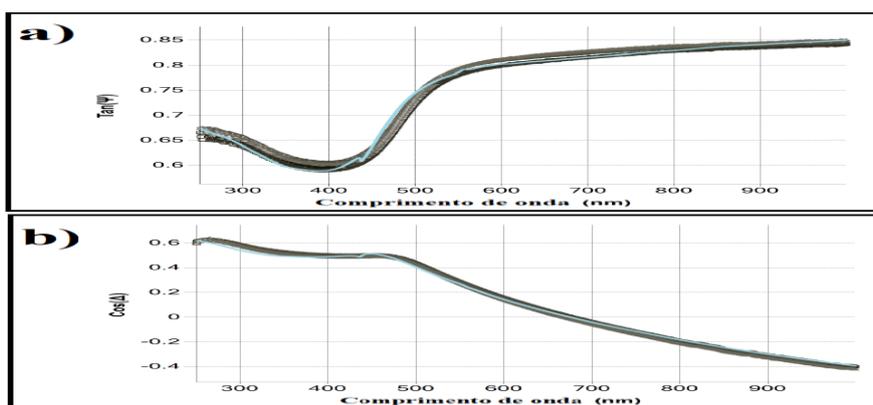


Figura 6. Comparação das curvas teóricas e experimentais da amostra. a) $\tan \Psi$. b) $\cos \Delta$.

Essa conformidade sucedeu a um bom parâmetro estatístico R^2 e um baixo erro RMSE dos dados de $\tan \Psi$ e $\cos \Delta$ em correlação ao comprimento de onda empregado, como mostra a tabela 3.

Tabela3. Parâmetros estatísticos R^2 e RMSE para cada amostra de liga de cobre e zinco pura

Amostras	R^2	RMSE
Amostra 01.	0,99323	0,00758
Amostra 02.	0,99440	0,00760
Amostra 03.	0,99346	0,00830
Amostra 04.	0,99587	0,00761
Amostra 05.	0,99532	0,00995

Posteriormente, são apresentadas as propriedades ópticas da liga de cobre e zinco pura por meio das medidas elipsométricas, sendo o índice de refração (n) e o coeficiente de extinção (k) nas regiões espectrais do ultravioleta, visível e infravermelho, conforme exhibe a Figura 7.

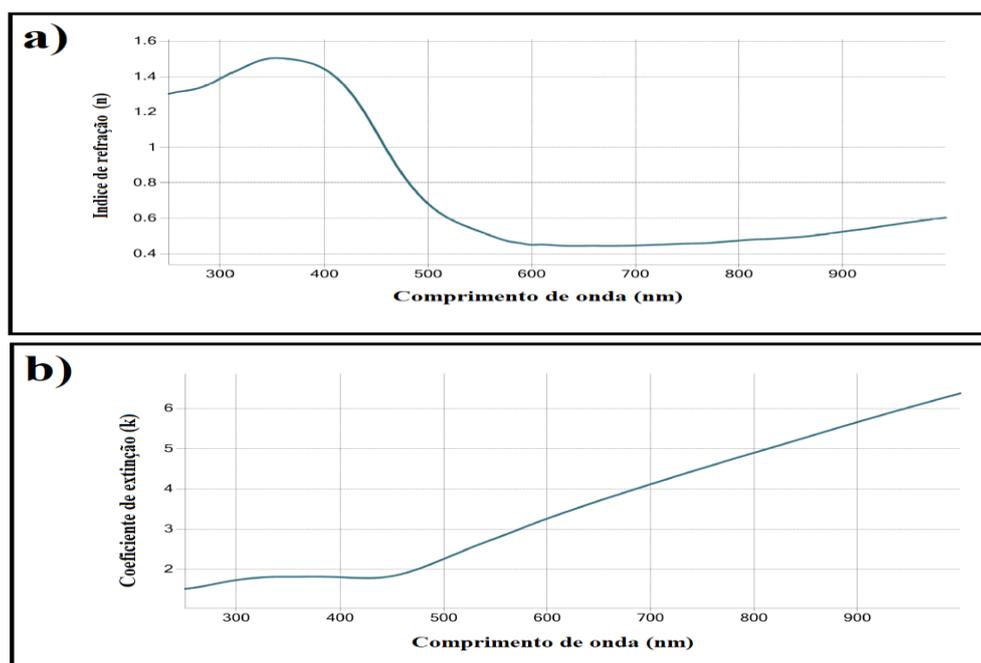


Figura 7. Curvas de propriedades ópticas do substrato da amostra de cobre e zinco pura. a) Índice de refração (n). b) Coeficiente de extinção (k).

Assim como no material puro, as amostras da liga de cobre e zinco com óxidos crescidos naturalmente obtiveram-se os parâmetros elipsométricos e notou-se uma boa concordância entre os ajustes das curvas de $\tan \Psi$ e $\cos \Delta$ em função do comprimento de onda para a amostra com distintos tempos de exposição, como mostra a figura 8, que representa as demais amostras.

Neste caso, o modelo utilizado para modelagem foi uma camada de substrato, uma camada composta pelo óxido crescido, sendo representada por leis de dispersão que descreve seu comportamento, sendo estas as leis de Drude e Lorentz, e também foi adicionada uma faixa de rugosidade na superfície composta pelo material e ar.

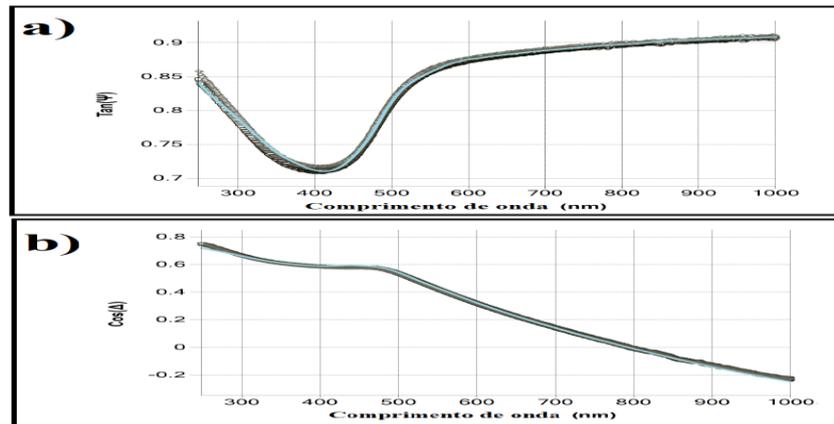


Figura 8. Comparação das curvas teóricas e experimentais com óxidos crescidos naturalmente por 29 dias de exposição. a) $\tan \Psi$. b) $\cos \Delta$.

Essa conformidade de resultados sucedeu a um bom parâmetro estatístico R^2 e um baixo erro RMSE dos dados de $\tan \Psi$ e $\cos \Delta$ em correlação ao comprimento de onda empregado, como mostra a tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros estatísticos R^2 e RMSE da liga com óxidos crescidos naturalmente

Tempo de Exposição	R^2	RMSE
1 dia.	0,99522	0,00732
7 dias.	0,99413	0,00699
14 dias.	0,99523	0,00394
21 dias.	0,99830	0,00315
29 dias.	0,99748	0,00348

A técnica de Elipsometria proporcionou a medição da espessura da camada de óxidos crescidos naturalmente sobre a superfície do substrato da liga de cobre e zinco. Assim, foi analisada a influência do tempo de exposição da liga a atmosfera gasosa e sua oxidação natural devido a este fenômeno até o momento que o crescimento se estabiliza, conforme mostra a Tabela 5.

Tabela 5. Espessuras de filmes finos de óxidos crescidos naturalmente

Tempo de Exposição	Espessura de filmes finos de óxidos (nm)
1 dia.	4,755 nm
7 dias.	5,855 nm
14 dias.	7,469 nm
21 dias.	8,648 nm
29 dias.	11,196 nm

4 CONCLUSÃO

Os resultados experimentais de espessura de óxidos da liga de cobre e zinco apresentaram valores coesos de um crescimento linear, pois houve uma correlação entre o aumento dos filmes finos de óxidos formados de acordo com o incremento do tempo de exposição, e por meio da microscopia confocal percebeu-se que não há

discrepância dos valores de rugosidade com os fenômenos de oxidação. Essa correlação pode ser visto pela Figura 9, onde foi possível traçar uma linha de tendência de acordo com os métodos dos mínimos quadrados com os valores encontrados e expostos pela tabela 5.

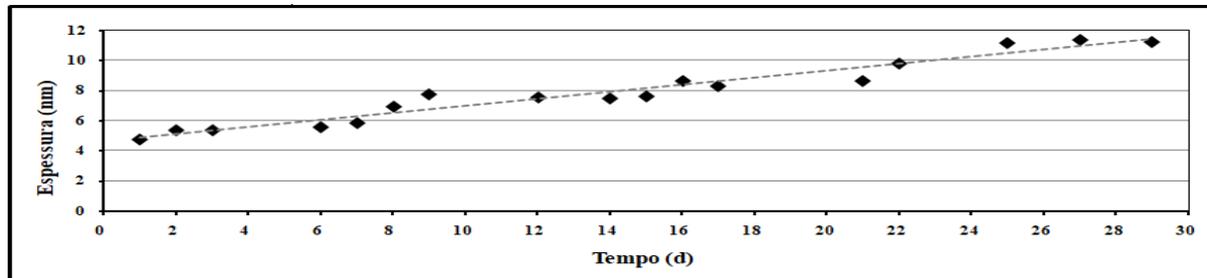


Figura 9. Tendência de crescimento natural de óxidos da amostra de liga de cobre e zinco

Agradecimentos

Os autores deste estudo agradecem à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) pela compra do Microscópio Eletrônico de Varredura ZEISS EVO MA 10, do Microscópio Interferométrico Confocal LEICA DCM3D e do Elipsômetro Espectroscópico SEMILAB GES 5S. Agradecem também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelas bolsas do primeiro ao quarto autor.

REFERÊNCIAS

- 1 R. Francis, The corrosion of copper and its alloys: a practical guide for engineers. Houston, Tex: NACE International, 2010.
- 2 J. R. Davis, Org., Copper and copper alloys. Materials Park, OH: ASM International, 2001.
- 3 M. F. Ashby e D. R. H. Jones, Engineering Materials: An Introduction to Properties, Applications and Design, 3º ed. Amsterdam: Elsevier, 2009.
- 4 N. Perez, Electrochemistry and Corrosion Science, 2º ed. Springer, 2016.
- 5 W. D. Callister e D. G. Rethwisch, Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução, 9º ed. LTC, 2016.
- 6 H. G. Tompkins e J. N. Hilfiker, Spectroscopic Ellipsometry: Practical Application to Thin Film Characterization. Momentum Press, LLC, 2016.
- 7 H. Fujiwara, Spectroscopic Ellipsometry: Principles and Applications. John Wiley & Sons, 2007.
- 8 M. Losurdo e K. Hingerl, Ellipsometry at the nanoscale. New York: Springer, 2013.
- 9 W. G. Jerome e R. L. Price, Basic Confocal Microscopy, 2º ed. Springer, 2018.
- 10 D. E. Aspnes, "Spectroscopic ellipsometry — Past, present, and future", Thin Solid Films, vol. 571, p. 334–344, 2014.
- 11 B. A. Dedavid, C. I. Gomes, e G. Machado, Microscopia Eletrônica de Varredura: Aplicações e preparação de amostras - Materiais Poliméricos, metálicos e semicondutores. ediPUCRS, 2007.
- 12 ASTM E3-95: An American National Standard, Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens. 1995.
- 13 ISO 4288, Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. 2008.