

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**ÁREA DO CONHECIMENTO DAS CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**  
**BACHARELADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**ARTHUR TOSS GATELLI**

**ANÁLISE MORFOLÓGICA DE ESTRUTURAS NANOMÉTRICAS DE COBRE E  
DE CARBETO DE SILÍCIO DEPOSITADAS POR PVD**

**CAXIAS DO SUL**

**2026**

**ARTHUR TOSS GATELLI**

**ANÁLISE MORFOLÓGICA DE ESTRUTURAS NANOMÉTRICAS DE COBRE E  
DE CARBETO DE SILÍCIO DEPOSITADAS POR PVD**

Trabalho de Conclusão de Curso II  
apresentado à Universidade de Caxias do Sul,  
como requisito parcial à obtenção do título de  
bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof.: Tiago Cassol Severo

**CAXIAS DO SUL  
2026**

**ARTHUR TOSS GATELLI**

**ANÁLISE MORFOLÓGICA DE ESTRUTURAS NANOMÉTRICAS DE COBRE E  
DE CARBETO DE SILÍCIO DEPOSITADAS POR PVD**

Trabalho de Conclusão de Curso II  
apresentado à Universidade de Caxias do Sul,  
como requisito parcial à obtenção do título de  
bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientadores: Prof.: Tiago Cassol Severo

**Aprovado em:**

**Banca Examinadora**

---

Prof. Dr. Matheus Poletto  
Universidade de Caxias do Sul

---

Prof. Dr. Cesar Aguzzoli  
Universidade de Caxias do Sul

## RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo analisar as características morfológicas, composicionais e estruturais de filmes finos de Cu e SiC obtidos por PVD. Os filmes de Cu foram depositados sobre substratos de vidro por magnetron sputtering DC, utilizando tempos de deposição de 3, 5 e 7 minutos, enquanto os filmes de SiC foram depositados sobre substratos de Al por magnetron sputtering RF. A caracterização das amostras foi realizada por fluorescência de raios X (XRF), microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia por dispersão de energia (EDS) e difração de raios X (DRX). Os resultados demonstraram que o aumento do tempo de deposição resultou em aumento da espessura dos filmes de Cu, variando de aproximadamente 193 nm a 336 nm. As análises por MEV e EDS evidenciaram a formação de filmes contínuos e a composição química esperada, enquanto os difratogramas indicaram a estrutura cristalina cúbica de face centrada (FCC) do Cu. Para os filmes de SiC depositados sobre substratos de Al, as análises de XRF, MEV e EDS evidenciaram a formação de uma camada contendo Si e C, com espessura média de aproximadamente 242 nm. Os resultados de DRX não evidenciaram picos cristalinos atribuíveis ao SiC, indicando caráter predominantemente amorfo do filme nas condições de deposição empregadas. As tentativas de deposição de SiC sobre filmes de Cu não resultaram em camadas com aderência suficiente para a realização das caracterizações previstas.

**Palavras-chave:** filmes finos; *magnetron sputtering*; Cu; SiC; caracterização de materiais.



## **ABSTRACT**

This study aimed to analyze the morphological, compositional, and structural characteristics of Cu and SiC thin films produced by Physical Vapor Deposition (PVD). Cu films were deposited onto glass substrates by DC magnetron sputtering using deposition times of 3, 5, and 7 minutes, while SiC films were deposited onto Al substrates by RF magnetron sputtering. The samples were characterized by X-ray fluorescence (XRF), scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), and X-ray diffraction (XRD). The results showed that increasing the deposition time led to an increase in the thickness of the Cu films, ranging from approximately 193 nm to 336 nm. SEM and EDS analyses revealed the formation of continuous Cu films with the expected chemical composition, while XRD patterns indicated the face-centered cubic (FCC) crystalline structure of Cu. For the SiC films deposited on Al substrates, XRF, SEM, and EDS analyses confirmed the formation of a Si- and C-containing layer with an average thickness of approximately 242 nm. XRD analyses did not reveal crystalline peaks attributable to SiC, indicating a predominantly amorphous character of the films under the deposition conditions employed. Attempts to deposit SiC onto Cu films did not result in layers with sufficient adhesion to allow the planned characterizations.

**Keywords:** thin films; magnetron sputtering; Cu; SiC; materials characterization.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Empilhamento MIM (Cu/SiN <sub>x</sub> /Cu).....                                                                                                                                                                                                                                                    | 17 |
| Figura 2 – (a) Relação tensão–corrente (V–I) no regime ôhmico. (b) Circuito resistivo simples ilustrando a Lei de Ohm.....                                                                                                                                                                                    | 18 |
| Figura 3 – Relação entre resistência e geometria do condutor $R=\rho L/A$ .....                                                                                                                                                                                                                               | 19 |
| Figura 4 – Bandas de energia para materiais metálicos, semicondutores e isolantes.....                                                                                                                                                                                                                        | 20 |
| Figura 5– Exemplo de morfologia “couve-flor” em superfície de Cu.....                                                                                                                                                                                                                                         | 23 |
| Figura 6 – Esquema o processo de magnetron sputtering.....                                                                                                                                                                                                                                                    | 25 |
| Figura 7 – Evolução morfológica do metal ultrafino. Sequência ilustrativa: ilhas → coalescência → filme contínuo.....                                                                                                                                                                                         | 25 |
| Figura 8 – Imagens do substrato Cu/Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Cu fabricado: (a) imagens SAT das faces superior e inferior, com áreas de ligação delimitadas; (b) micrografias em corte transversal obtidas por SEM mostrando a interface Cu/Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> e a camada intermediária..... | 29 |
| Figura 9 – Imagens STEM de camadas de a-SiN <sub>x</sub> : (a) filme sem hidrogênio e (b) filme a-SiN <sub>x</sub> :H.....                                                                                                                                                                                    | 30 |
| Figura 10 – Imagens de MEV de uma liga Cu-estanho obtidas por sputtering: (a) superfície com menor magnificação e (b) superfície com maior magnificação.....                                                                                                                                                  | 31 |
| Figura 11 – Micrografias de MEV de ligas à base de Cu com diferentes teores de SiC: (a) amostra base sem adição de SiC; (b) adição de 0,5% de SiC; (c) adição de 1% de SiC; (d) adição de 3% de SiC.....                                                                                                      | 32 |
| Figura 12 – Fluxograma das etapas experimentais do estudo.....                                                                                                                                                                                                                                                | 34 |
| Figura 13 – Planejamento dimensional das máscaras utilizadas nas deposições e representação esquemática da deposição esperada sobre o substrato.....                                                                                                                                                          | 39 |
| Figura 14 – Máscara de cobre confeccionada e utilizada durante as deposições dos filmes finos.....                                                                                                                                                                                                            | 40 |
| Figura 16 – Amostras obtidas após a deposição de Cu por magnetron sputtering DC: (a) conjunto das amostras depositadas nos tempos de 3, 5 e 7 min; (b) amostra depositada durante 5 min utilizando máscara de deposição; (c) amostra depositada durante 5 min sem utilização de máscara.....                  | 41 |
| Figura 17 – Micrografia da superfície do filme de Cu de 3 min depositado por magnetron sputtering (100.000×).....                                                                                                                                                                                             | 44 |
| Figura 18 – Micrografia da seção do filme de Cu de 7 min depositado por magnetron sputtering: a) 20.000×; b) 50.000× com medidas.....                                                                                                                                                                         | 45 |
| Figura 19 – Micrografia de seção transversal da amostra de Cu depositada durante 5 minutos, indicando os pontos utilizados para análise por EDS.....                                                                                                                                                          | 46 |
| Figura 20 – Espectro EDS: a) ponto 7; b) ponto 9.....                                                                                                                                                                                                                                                         | 47 |
| Figura 21 – Difratoograma da amostra de Cu: a) 3 min; b) 7 min.....                                                                                                                                                                                                                                           | 48 |
| Figura 22 – Deposição do SiC.....                                                                                                                                                                                                                                                                             | 49 |
| Figura 23 – Micrografia da superfície do substrato de Al (50.000×): a) sem deposição; b) com deposição de SiC.....                                                                                                                                                                                            | 51 |
| Figura 24 – Região analisada por MEV: a) do Al sem deposição; b) da amostra Al + SiC.....                                                                                                                                                                                                                     | 52 |
| Figura 25– Espectro EDS: a) do Al sem deposição; b) da amostra Al + SiC.....                                                                                                                                                                                                                                  | 52 |
| Figura 26– Mapas de distribuição química do Al sem deposição.....                                                                                                                                                                                                                                             | 53 |

|                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 27– Mapas de distribuição química da amostra Al + SiC.....                                                                                   | 54 |
| Figura 28– Difratoograma: a) do substrato de Al sem deposição; b) da amostra Al + SiC.....                                                          | 55 |
| Figura A1– Resultados de XRF: a) 3 min; b) 3 min-2; c) 5 min; d) 5 min-2; e) 7 min; f) 7 min-2.....                                                 | 62 |
| Figura B1– Espectro EDS da amostra de 5 minutos; a) ponto 6; b) ponto 8; c) ponto 10.....                                                           | 63 |
| Figura B2– Micrografia de seção transversal da amostra de Cu depositada durante 3 minutos, indicando os pontos utilizados para análise por EDS..... | 63 |
| Figura B3– Espectros de EDS da amostra de 3 minutos, a) ponto 1; b) ponto 2; c) ponto 3, d) ponto 4, e) ponto 5.....                                | 63 |
| Figura B4– Micrografia de seção transversal da amostra de Cu depositada durante 7 minutos, indicando os pontos utilizados para análise por EDS..... | 64 |
| Figura B5– Espectros de EDS da amostra de 7 minutos, a) ponto 11; b) ponto 12; c) ponto 13, d) ponto 14, e) ponto 15.....                           | 64 |
| Figura C1– Imagens de MEV da amostra de 3 minutos, a) 20.000X; b) 50.000 X; c) 50.000 X com medidas; d) 100.000 X.....                              | 65 |
| Figura C2– Imagens de MEV da amostra de 5 minutos, a) 20.000X; b) 50.000 X; c) 50.000 X com medidas; d) 100.000 X; e) superfície 100.000 X.....     | 65 |
| Figura C3– Imagens de MEV da amostra de 7 minutos, a) 50.000 X; b) 100.000 X; c) superfície 100.000 X.....                                          | 66 |
| Figura D1– Imagens de MEV da amostra de Al sem deposição, a) 5.000X; b) 20.000 X.....                                                               | 66 |
| Figura D2– Imagens de MEV da amostra de Al com deposição do SiC, a) 5.000X; b) 10.000 X; c) 20.000 X;.....                                          | 67 |

## **LISTA DE TABELAS**

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Condições de deposição e espessuras características de transição morfológica para filmes metálicos depositados por magnetron sputtering..... | 28 |
| Tabela 2 - Resultados obtidos por XRF para a deposição de Ti.....                                                                                       | 40 |
| Tabela 3 - Resultados obtidos por XRF para a deposição de Cu.....                                                                                       | 42 |
| Tabela 4 - Resultados obtidos por MEV para a deposição de Cu.....                                                                                       | 43 |
| Tabela 5 - Resultados obtidos por XRF para a deposição de SiC.....                                                                                      | 50 |
| Tabela A1 – Resultados individuais de espessura obtidos por XRF para as amostras de Cu..                                                                | 62 |

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

|                                          |                                                                            |
|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| A                                        | Área do eletrodo ( $\text{m}^2$ )                                          |
| d, t                                     | Espessura de filme/dielétrico (m ou nm)                                    |
| E                                        | Campo elétrico ( $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ )                            |
| $E_g$                                    | Largura de banda proibida (eV)                                             |
| h                                        | Espessura do filme metálico (m ou nm)                                      |
| I                                        | Corrente elétrica (A)                                                      |
| R                                        | Resistência elétrica ( $\Omega$ )                                          |
| $\sigma$                                 | Condutividade elétrica ( $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ )                    |
| $\text{SiN}_x$ / $\text{Si}_3\text{N}_4$ | Nitreto de Si (estequiometria variável / estequiométrico)                  |
| SiC                                      | Carbeto de Silício                                                         |
| Cu                                       | Cobre                                                                      |
| Ti                                       | Titânio                                                                    |
| MIM                                      | Metal–Isolante–Metal (capacitor de placa paralela)                         |
| PVD                                      | <i>Physical Vapor Deposition</i>                                           |
| CVD                                      | <i>Chemical Vapor Deposition</i>                                           |
| LPCVD                                    | <i>Low-Pressure CVD</i>                                                    |
| PECVD                                    | <i>Plasma-Enhanced CVD</i>                                                 |
| DC                                       | Corrente contínua                                                          |
| RF <i>sputtering</i>                     | <i>Sputtering</i> em radiofrequência (13,56 MHz; essencial p/ dielétricos) |
| MEV                                      | Microscopia Eletrônica de Varredura                                        |
| EDS                                      | Espectroscopia de Energia Dispersiva                                       |
| DRX/XRD                                  | Difração de Raios X                                                        |
| XRF                                      | Fluorescência de raios X                                                   |
| Vbd                                      | Tensão de ruptura dielétrica (V)                                           |
| $\rho$                                   | Resistividade elétrica ( $\Omega\cdot\text{m}$ )                           |
| L                                        | Comprimento do condutor (m)                                                |
| V                                        | Tensão Elétrica (V)                                                        |
| $E_f$                                    | Nível de Fermi (eV)                                                        |
| CTE                                      | Coefficiente de expansão térmica ( $\text{K}^{-1}$ )                       |
| Th                                       | Espessura Teórica (nm)                                                     |
| hperc                                    | Espessura Percentual (nm)                                                  |
| hcont                                    | Espessura Contínua (nm)                                                    |
| IP                                       | <i>Ion Plating</i>                                                         |
| FCC                                      | Cúbica de Face Centrada                                                    |
| sccm                                     | Centímetros Cúbicos Padrão por Minuto                                      |

## SUMÁRIO

|                                                                                                  |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>                                                                        | <b>12</b> |
| <b>2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS.....</b>                                                        | <b>14</b> |
| <b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>                                                             | <b>16</b> |
| 3.1 NANOFILMES E APLICAÇÕES.....                                                                 | 16        |
| 3.2 A CONDUÇÃO ELÉTRICA EM MATERIAIS.....                                                        | 18        |
| 3.2.1 Cargas elétricas, resistividade, condutividade de materiais, características elétricas     | 18        |
| 3.2.2 Classificação elétrica dos materiais — Condutores e Isolantes.....                         | 21        |
| 3.3 CONDUÇÃO ELÉTRICA EM NANOFILMES.....                                                         | 22        |
| 3.3.1 Conceitos básicos.....                                                                     | 22        |
| 3.4 DEPOSIÇÃO DE FILMES BASEADA EM MAGNETRON SPUTTERING.....                                     | 24        |
| 3.4.1 Fundamentos do Processo e Formação do Plasma.....                                          | 24        |
| 3.4.2 Crescimento Morfológico e Continuidade Elétrica dos Filmes.....                            | 25        |
| 3.5 ESTADO DA ARTE.....                                                                          | 26        |
| 3.5.1 Deposição multicamada de Cu/SiN <sub>x</sub> por magnetron sputtering.....                 | 26        |
| 3.5.2 Propriedades elétricas de filmes Cu–SiN <sub>x</sub> depositados por magnetron sputtering. | 27        |
| 3.5.3 Monitoramento in situ do crescimento de filmes metálicos ultrafinos.....                   | 27        |
| 3.5.4 União Cu–Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> por deposição multicamada ativa.....               | 28        |
| 3.5.5 Revisão sobre filmes finos de nitreto de Si e nitreto de Si hidrogenado.....               | 29        |
| 3.5.6 Influência dos parâmetros de sputtering na condutividade de filmes metálicos.....          | 30        |
| 3.5.7 Influência da adição de SiC em ligas à base de Cu.....                                     | 31        |
| <b>4. METODOLOGIA.....</b>                                                                       | <b>34</b> |
| 4.1 PREPARAÇÃO DO SUBSTRATO, DESIGN E CONSTRUÇÃO DAS MÁSCARAS... 35                              | 35        |
| 4.2 PREPARAÇÃO PARA AS DEPOSIÇÕES.....                                                           | 35        |
| 4.3 PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO DO Cu.....                                                           | 36        |
| 4.4 PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO DO SiC.....                                                          | 36        |
| 4.5 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA, COMPOSICIONAL E ESTRUTURAL.....                                  | 37        |
| <b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>                                                            | <b>38</b> |
| 5.1 CONFECÇÃO DAS MÁSCARAS.....                                                                  | 39        |
| 5.2 LIMPEZA, ETCHING E DEPOSIÇÃO DE TI.....                                                      | 40        |
| 5.3 DEPOSIÇÃO DE COBRE.....                                                                      | 41        |
| 5.3.1 Fluorescência de Raios X do Cu.....                                                        | 42        |
| 5.3.2 MEV e EDS do Cu.....                                                                       | 43        |
| 5.3.3 Difração de Raios X do Cu.....                                                             | 48        |
| 5.4 DEPOSIÇÃO DE CARBETO DE SILÍCIO.....                                                         | 49        |
| 5.4.1 Fluorescência de Raios X do SiC.....                                                       | 49        |
| 5.4.2 MEV e EDS do SiC.....                                                                      | 50        |

|                                                                               |           |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>5.4.3 Difração de Raios X do SiC.....</b>                                  | <b>55</b> |
| <b>6. CONCLUSÕES.....</b>                                                     | <b>57</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                                       | <b>59</b> |
| <b>APÊNDICES.....</b>                                                         | <b>62</b> |
| APÊNDICE A – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE XRF DAS AMOSTRAS DE COBRE...           | 62        |
| APÊNDICE B – ESPECTROS EDS COMPLEMENTARES DA AMOSTRA DE COBRE.                | 63        |
| APÊNDICE C – IMAGENS MEV COMPLEMENTARES DA AMOSTRA DE COBRE....               | 65        |
| APÊNDICE D – IMAGENS MEV COMPLEMENTARES DA AMOSTRA DE CARBETO DE SILÍCIO..... | 66        |

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de filmes finos consolidou-se como uma área relevante da ciência dos materiais devido à crescente demanda por dispositivos miniaturizados e materiais com propriedades controladas em escala nanométrica. Esses materiais, cuja espessura varia de poucos nanômetros a alguns micrômetros, são utilizados em aplicações eletrônicas, ópticas, mecânicas e funcionais. A possibilidade de controlar características como espessura, morfologia, composição química e estrutura cristalina torna os filmes finos fundamentais para o desenvolvimento de tecnologias avançadas em setores como microeletrônica, optoeletrônica e revestimentos funcionais (TOMA, 2009; CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

A obtenção de filmes finos com propriedades adequadas depende diretamente do processo de deposição empregado. Entre as técnicas disponíveis, os processos de deposição física a vapor (PVD) destacam-se pela capacidade de produzir filmes com pureza, uniformidade e controle de espessura. Dentre essas técnicas, o *magnetron sputtering* é utilizado devido à versatilidade e reprodutibilidade, permitindo a deposição de materiais metálicos e cerâmicos por meio do bombardeamento de um alvo por íons energéticos. Parâmetros como potência, pressão de trabalho, fluxo de gás e tempo de deposição influenciam diretamente a taxa de crescimento e as características finais dos filmes obtidos (MATTOX, 2010; LIU et al., 2023).

O Cu é amplamente empregado na fabricação de filmes finos devido à condutividade elétrica e à aplicação em dispositivos eletrônicos e sistemas de interconexão. Já o SiC destaca-se pela estabilidade química, resistência ao desgaste e potencial de aplicação em revestimentos funcionais e dispositivos eletrônicos. A combinação desses materiais permite investigar a influência dos parâmetros de deposição sobre a formação dos filmes, as características morfológicas, a composição química e a estrutura cristalina (MASRI, 2002; WESCH, 1996).

Sob o ponto de vista sustentável, os processos PVD também podem ser relacionados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente ao ODS 7 (Energia Limpa e Acessível) e ao ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura). Técnicas como o *magnetron sputtering* possibilitam a deposição controlada de materiais com aproveitamento de matéria-prima e reduzida geração de resíduos quando comparadas a processos químicos



convencionais, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e sustentáveis (ONU, 2015).

O presente trabalho tem como objetivo avaliar as características morfológicas e estruturais de filmes finos de Cu e SiC depositados por técnicas PVD. Para isso, foram empregadas técnicas de caracterização como fluorescência de raios X (XRF), microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia por dispersão de energia (EDS) e difração de raios X (DRX), buscando correlacionar os parâmetros de deposição com as características dos filmes obtidos.

## 2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar o comportamento morfológico de filmes finos de Cu e SiC, depositados por PVD, utilizando geometrias padronizadas de medição, avaliando a influência dos parâmetros de deposição na morfologia, composição química, espessura e estrutura cristalina das camadas obtidas.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a continuidade dos filmes metálicos de Cu por meio de análise morfológica utilizando MEV.
- Avaliar a influência do tempo de deposição (3, 5 e 7 minutos) na formação, continuidade e espessura dos filmes de Cu depositados por *magnetron sputtering*.
- Determinar a espessura dos filmes depositados por meio de XRF, correlacionando os resultados com os parâmetros de deposição.
- Verificar a formação de filmes de SiC sobre substratos de Al por meio da análise da morfologia, composição química, espessura e estrutura cristalina.

### 2.3 JUSTIFICATIVA DO TEMA

O estudo de filmes finos possui relevância científica e tecnológica para o avanço de tecnologias aplicadas à microeletrônica, revestimentos funcionais e dispositivos avançados. Em sistemas nanométricos, características como espessura, morfologia, composição química e estrutura cristalina são influenciadas pelas condições de deposição empregadas. Nesse contexto, estruturas baseadas em Cu e SiC constituem um modelo interessante para investigação, permitindo avaliar a interação entre um material metálico e um material cerâmico de estabilidade estrutural. A compreensão da influência dos parâmetros de deposição sobre as características dos filmes contribui diretamente para a otimização de processos de fabricação e para o desenvolvimento de novas aplicações tecnológicas (ROSSNAGEL; KUAN, 2004 ; LIU et al., 2023; WESCH, 1996).

O *magnetron sputtering* apresenta características do processo em relação a outros métodos de deposição, destacando-se pelo controle da espessura, da taxa de crescimento e

das condições de plasma. Essa técnica permite a obtenção de filmes metálicos com adesão, uniformidade e controle microestrutural, mesmo em temperaturas relativamente baixas. No caso do Cu, tais características favorecem a formação de camadas contínuas e homogêneas. Já a deposição de SiC por técnicas PVD possibilita a obtenção de filmes com estabilidade química, resistência ao desgaste e potencial para aplicações em ambientes severos. A investigação da influência dos parâmetros de deposição sobre esses materiais contribui para ampliar o conhecimento acerca da formação e evolução microestrutural (MATTOX, 2010; MASRI, 2002).

Do ponto de vista científico e tecnológico, a pesquisa contribui para o entendimento dos mecanismos de crescimento de filmes finos produzidos por deposição física a vapor, bem como para a correlação entre parâmetros de processamento, espessura, composição química, morfologia e estrutura cristalina. A abordagem adotada permite estabelecer relações diretas entre as condições de deposição e as características dos materiais obtidos, fornecendo subsídios para a otimização de processos e para o desenvolvimento de aplicações baseadas em filmes finos de Cu e SiC.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 NANOFILMES E APLICAÇÕES

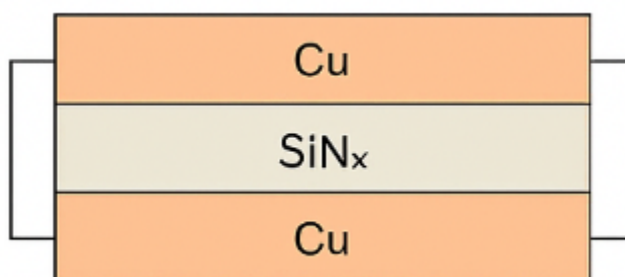
Filmes finos podem ser definidos como camadas de material depositadas sobre um substrato, com espessuras que variam de poucos nanômetros até a faixa micrométrica. Devido à elevada razão área/volume e à presença de interfaces bem definidas, esses materiais apresentam propriedades ópticas, elétricas e térmicas distintas daquelas observadas em materiais maciços. Essa característica possibilita a aplicação em dispositivos eletrônicos, sensores, revestimentos funcionais e sistemas micro e nanoestruturados (OHRING, 2002; CALLISTER, 2016).

Os filmes finos vêm sendo amplamente empregados em setores que demandam miniaturização e controle de propriedades funcionais, especialmente em aplicações de alta tecnologia. Na microeletrônica, são utilizados na fabricação de interconexões, barreiras de difusão e camadas condutoras em circuitos integrados, onde a redução da espessura permite o ajuste da resistência elétrica e das características de resposta dos dispositivos. Em sensores e atuadores, a deposição de filmes em escala nanométrica possibilita a detecção de variações de temperatura, pressão ou composição química, em função da elevada influência das propriedades superficiais no comportamento do material (TOMA, 2009).

Uma das formas de aplicação de filmes finos em dispositivos eletrônicos está associada à utilização de camadas metálicas e cerâmicas com funções distintas, onde materiais condutores são empregados para o transporte de carga elétrica, enquanto materiais com elevada estabilidade estrutural atuam na modulação das propriedades elétricas do sistema. A combinação desses materiais em escala reduzida permite ajustar parâmetros como resistência elétrica, continuidade do filme e interação entre camadas, aspectos relevantes para o desempenho de dispositivos baseados em filmes finos (MATTOX, 2010; PANA et al., 2022)

A Figura 1 apresenta um esquema representativo de empilhamento MIM do tipo Cu/SiN<sub>x</sub>/Cu, no qual o Cu atua como eletrodo e o SiN<sub>x</sub> como camada isolante. Essa arquitetura evidencia como o controle da espessura e da uniformidade dos filmes é essencial para garantir desempenho e estabilidade em dispositivos baseados em nanofilmes.

**Figura 1** – Empilhamento MIM (Cu/SiN<sub>x</sub>/Cu).



Fonte: Adaptado de TATSUMI et al. (2024).

Estruturas multicamadas desse tipo são amplamente utilizadas em componentes microeletrônicos e em revestimentos funcionais, nos quais é necessário controlar a espessura e a uniformidade das interfaces para assegurar desempenho e estabilidade. O domínio da deposição em escala nanométrica permite projetar camadas com espessuras específicas e morfologia ajustada à aplicação, assegurando repetibilidade e compatibilidade com processos industriais de microfabricação (COLIN et al., 2020; LOOS, 2014).

No campo dos revestimentos funcionais, filmes finos metálicos e cerâmicos são empregados para modificar propriedades superficiais, como resistência à oxidação, condutividade elétrica e estabilidade química. Materiais cerâmicos, como óxidos, nitretos e carbetos, podem atuar na proteção de superfícies e na modulação das propriedades elétricas quando combinados com camadas metálicas. Essas características tornam os filmes finos relevantes para aplicações que exigem controle de interface e desempenho em condições variadas de operação (LOOS, 2014; OHRING, 2002).

Além das aplicações em microeletrônica e sensores, filmes finos também são empregados em dispositivos de armazenamento de energia, revestimentos tribológicos e sistemas de proteção superficial, nos quais o controle microestrutural influencia diretamente o desempenho e a durabilidade. A versatilidade desses materiais está associada à possibilidade de ajustar propriedades por meio da variação de parâmetros como espessura, composição e estrutura do filme, permitindo a adaptação a diferentes aplicações tecnológicas (TOMA, 2009; LOOS, 2014).

## 3.2 A CONDUÇÃO ELÉTRICA EM MATERIAIS

### 3.2.1 Cargas elétricas, resistividade, condutividade de materiais, características elétricas

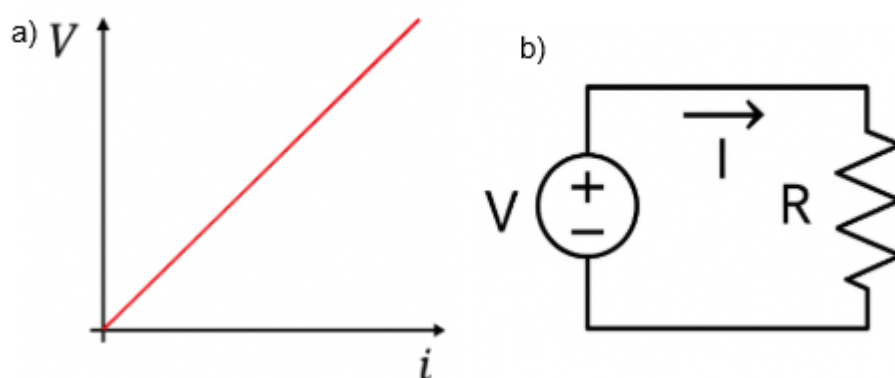
A condução elétrica em materiais está fundamentada no movimento ordenado de cargas elétricas, geralmente elétrons, sob a ação de um campo elétrico. Quando uma diferença de potencial (tensão) é aplicada entre dois pontos de um condutor, estabelece-se um fluxo de corrente elétrica ( $I$ ), cuja intensidade é proporcional à tensão aplicada. Essa relação linear define o comportamento ôhmico, expresso pela Lei de Ohm:

$$V = I \cdot R$$

*Equação 1 - Lei de Ohm (circuitos).*

em que  $V$  é a tensão elétrica (volts),  $I$  a corrente (ampères) e  $R$  a resistência elétrica (ohms). A Figura 2-a apresenta a relação linear tensão–corrente ( $V$ – $I$ ) no regime ôhmico, enquanto a Figura 2-b ilustra um circuito resistivo simples que expressa a Lei de Ohm.

**Figura 2** – (a) Relação tensão–corrente ( $V$ – $I$ ) no regime ôhmico. (b) Circuito resistivo simples ilustrando a Lei de Ohm



Fonte: Adaptado de MININI, Andrea [s.d].

A proporcionalidade entre corrente e tensão caracteriza materiais condutores ideais, cujo comportamento segue a linearidade prevista por Ohm (CALLISTER, 2016). A resistência elétrica representa a oposição interna de um material à passagem de corrente. Essa grandeza depende não apenas da natureza do material, mas também da geometria,

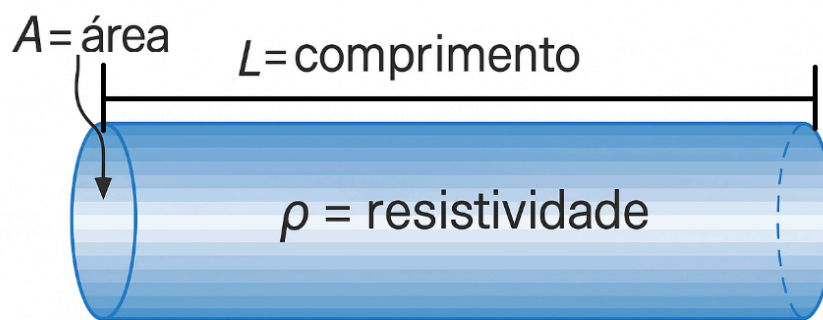
especialmente o comprimento (L) e a área da seção transversal (A). Assim, a resistência de um corpo homogêneo é dada por:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

*Equação 2 – Resistência de um corpo homogêneo.*

A Figura 3 ilustra a relação entre as variáveis geométricas e a resistividade, demonstrando que o aumento do comprimento ou a redução da área da seção transversal eleva a resistência total do condutor.

**Figura 3** – Relação entre resistência e geometria do condutor  $R = \rho L/A$



Fonte: Adaptado de OPENSTAX (2022).

A resistência é, portanto, função direta da resistividade ( $\rho$ ) e da geometria do material, parâmetros que determinam o comportamento elétrico macroscópico das amostras (ASHCROFT; MERMIN, 1976).

A resistividade ( $\rho$ ) é uma propriedade intrínseca do material, relacionada à facilidade com que as cargas se movem através de uma estrutura cristalina. O inverso da resistividade é denominado condutividade elétrica ( $\sigma$ ), expressa pela relação:

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

*Equação 3 – Definição de resistividade.*

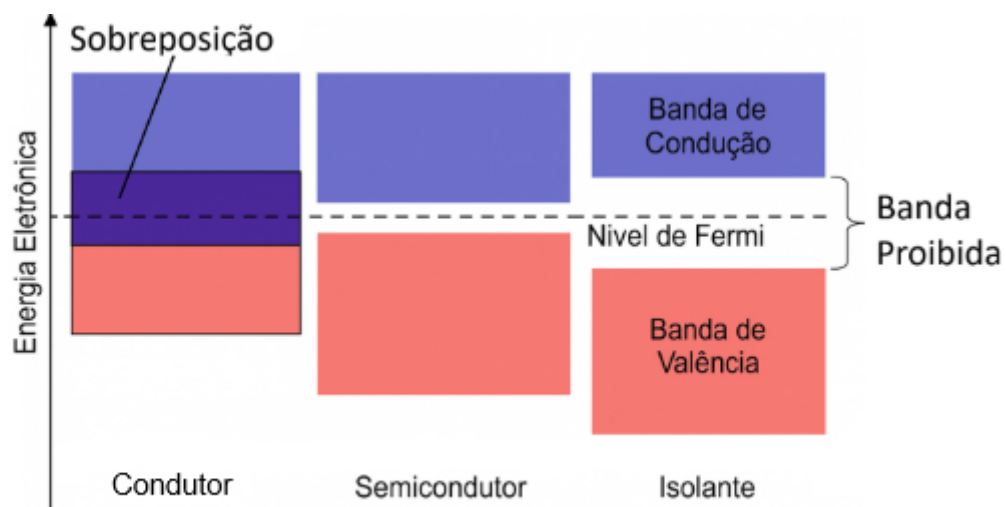
A resistividade é o inverso da condutividade; portanto, quanto maior a condutividade, menor a resistência interna do material à passagem de corrente. Materiais com alta condutividade, como Cu, prata e Al, possuem abundância de elétrons livres e redes cristalinas ordenadas que favorecem o movimento de cargas. Já em materiais dielétricos ou isolantes,

como o nitreto de Si, as cargas estão fortemente ligadas aos núcleos atômicos, exigindo campos elétricos muito intensos para provocar condução (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

O transporte de cargas pode ser descrito microscopicamente pelo modelo de bandas de energia, que considera os níveis energéticos disponíveis aos elétrons. Nos condutores, as bandas de valência e condução se sobrepõem, permitindo fluxo contínuo de elétrons. Em semicondutores e isolantes, essas bandas são separadas por uma banda proibida ( $E_g$ ), cuja largura determina a facilidade de excitação eletrônica para o nível de condução.

Entre essas bandas encontra-se o nível de Fermi ( $E_f$ ), que representa a energia máxima ocupada pelos elétrons a 0 K e define a probabilidade de ocupação dos estados eletrônicos. Nos condutores, o nível de Fermi situa-se dentro da banda de condução; em semicondutores, próximo à banda proibida; e em isolantes, mais afastado, dentro da região de gap energético. A Figura 4 apresenta o diagrama de bandas de energia para metais, semicondutores e isolantes.

**Figura 4** – Bandas de energia para materiais metálicos, semicondutores e isolantes.



Fonte: Adaptado de CORREIA; DANTAS; ANDRADE (2017)

A compreensão do modelo de bandas é essencial para o estudo de estruturas em escala nanométrica, nas quais os efeitos de confinamento e interface modificam a resistividade e a mobilidade eletrônica (ASHCROFT; MERMIN, 1976; TOMA, 2009).



### 3.2.2 Classificação elétrica dos materiais — Condutores e Isolantes

Os materiais sólidos podem ser classificados, sob o ponto de vista elétrico, conforme a facilidade com que permitem o movimento de cargas elétricas. Essa capacidade depende da estrutura eletrônica e da energia necessária para que os elétrons passem da banda de valência, onde permanecem ligados aos átomos, para a banda de condução, onde se tornam portadores livres. A diferença de energia entre essas bandas é denominada banda proibida e representa um dos principais parâmetros de distinção entre condutores e isolantes (ASHCROFT; MERMIN, 1976).

Nos materiais condutores, as bandas de valência e de condução se sobrepõem parcialmente, permitindo que elétrons se movam livremente mesmo a temperatura ambiente. Essa característica garante elevada densidade de estados disponíveis próximos ao nível de Fermi, possibilitando a condução de corrente elétrica sob a aplicação de campos elétricos relativamente baixos. O Cu é um exemplo típico de condutor metálico, amplamente utilizado devido à baixa resistividade elétrica e estabilidade química (CALLISTER; RETHWISCH, 2016). A condutividade nesses materiais depende da mobilidade eletrônica, da concentração de portadores de carga e da estrutura cristalina.

Em contrapartida, os materiais isolantes apresentam uma banda proibida larga, geralmente superior a 5 eV, o que dificulta a promoção de elétrons da banda de valência à banda de condução em condições normais. Como consequência, apresentam baixa densidade de portadores livres e condutividade elétrica reduzida, sendo comuns em materiais cerâmicos. O SiC, por exemplo, apresenta elevada estabilidade térmica e química, além de comportamento semicondutor ou isolante, dependendo da estrutura e condições de processamento (TOMA, 2009; LOOS, 2014).

A diferença fundamental entre condutores e isolantes está, portanto, na disponibilidade de elétrons capazes de responder a um campo elétrico aplicado. Nos metais, a condução ocorre pela movimentação de elétrons livres, enquanto em materiais isolantes ou semicondutores esse transporte é limitado pelas características da banda proibida. O entendimento desses mecanismos é essencial para a análise do comportamento elétrico em filmes finos, nos quais efeitos associados à espessura, microestrutura e interfaces podem influenciar significativamente o transporte de carga (CALLISTER; RETHWISCH, 2016; TOMA, 2009; LOOS, 2014).

### 3.3 CONDUÇÃO ELÉTRICA EM NANOFILMES

#### 3.3.1 Conceitos básicos

A condução elétrica em filmes finos apresenta comportamento distinto daquele observado em materiais maciços, principalmente em função da redução da espessura e do aumento da influência das interfaces e da microestrutura. Em escala nanométrica, o caminho percorrido pelos elétrons torna-se comparável à distância média livre de colisão, fazendo com que mecanismos de espalhamento em superfícies, contornos de grão e interfaces passem a influenciar significativamente o transporte de carga. Como consequência, a resistividade elétrica tende a aumentar com a redução da espessura do filme, especialmente em regimes nos quais a continuidade da camada ainda não está completamente estabelecida (CALLISTER; RETHWISCH, 2016; OHRING, 2002).

Nos filmes metálicos ultrafinos, como o Cu, o transporte eletrônico é fortemente influenciado pela microestrutura formada durante o processo de deposição. Inicialmente, os átomos metálicos nucleiam sobre o substrato formando ilhas discretas, que crescem e se aproximam à medida que a deposição prossegue. Esse processo evolui para a coalescência, caracterizada pela união progressiva de ilhas adjacentes até a formação de um filme contínuo. Antes que a coalescência seja completa, o material apresenta baixa condutividade elétrica, uma vez que o transporte de elétrons ocorre predominantemente por tunelamento entre ilhas separadas por lacunas nanométricas (TOMA, 2009; OHRING, 2002).

A espessura crítica é o ponto em que a continuidade elétrica é estabelecida, marcando a transição entre o comportamento isolante e o condutor. Abaixo desse valor, o filme apresenta condutividade descontínua, enquanto acima dele a condução se torna percolativa, ou seja, ocorre por caminhos conectados formados pelas regiões metálicas coalescidas. Esse regime de transição é particularmente sensível à morfologia da superfície, à energia dos átomos depositados e ao tipo de substrato, influenciando diretamente a resistividade elétrica final (TEIXEIRA, 2007).

Nos filmes condutores contínuos, a resistividade elétrica é influenciada por mecanismos adicionais de espalhamento, como o espalhamento em contornos de grão e o espalhamento em superfície. O primeiro ocorre quando os elétrons interagem com descontinuidades presentes nos limites entre grãos cristalinos, enquanto o segundo está associado à interação com a superfície livre do material. Em ambos os casos, há redução do livre caminho médio dos elétrons, resultando em aumento da resistividade elétrica. Esse

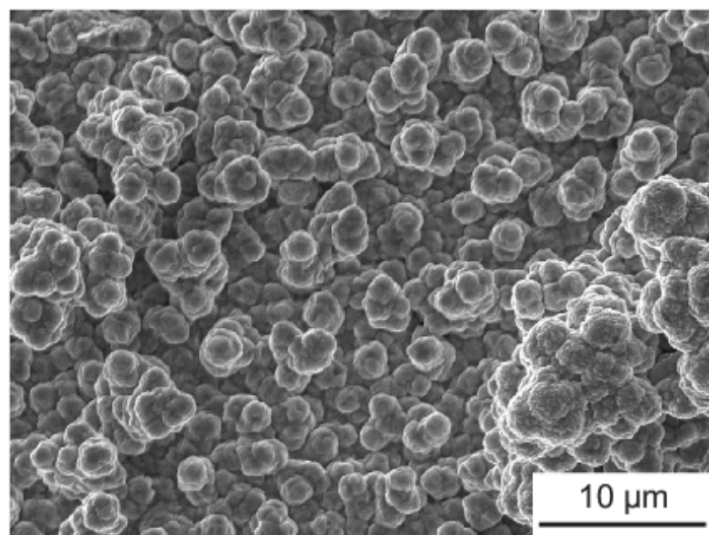
comportamento pode ser descrito por modelos clássicos de condução em filmes finos, que relacionam a resistividade com a espessura e as características microestruturais do material (OHRING, 2002; CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

A anisotropia elétrica pode ocorrer em filmes finos quando a condutividade varia conforme a direção de medição, sendo frequentemente associada à orientação preferencial dos grãos cristalinos ou a efeitos induzidos pelo processo de deposição. Nesses casos, filmes anisotrópicos apresentam resistividades distintas ao longo das direções paralela e perpendicular ao crescimento, enquanto filmes isotrópicos apresentam comportamento uniforme (TEIXEIRA, 2007).

O comportamento elétrico dos filmes finos resulta da combinação de fatores estruturais e dimensionais. A redução da espessura intensifica a influência das interfaces e dos mecanismos de espalhamento, tornando o transporte eletrônico sensível à morfologia, à microestrutura e às condições de deposição (TOMA, 2009; TEIXEIRA, 2007; LOOS, 2014).

Outro aspecto microestrutural relevante é a evolução do tamanho e da organização dos grãos com o aumento da espessura do filme. Durante o crescimento, grãos menores tendem a se agrupar, formando estruturas maiores, frequentemente descritas como morfologia do tipo “couve-flor”, conforme ilustrado na Figura 5. Essa reorganização altera a rugosidade superficial e a conectividade entre grãos, influenciando a quantidade de contornos que os portadores de carga encontram durante o transporte elétrico (TEIXEIRA, 2007).

**Figura 5**– Exemplo de morfologia “couve-flor” em superfície de Cu.



Fonte: KILIAN, A.; WEINZIERL, J.; SCHMIDT, L.-P. (2008).

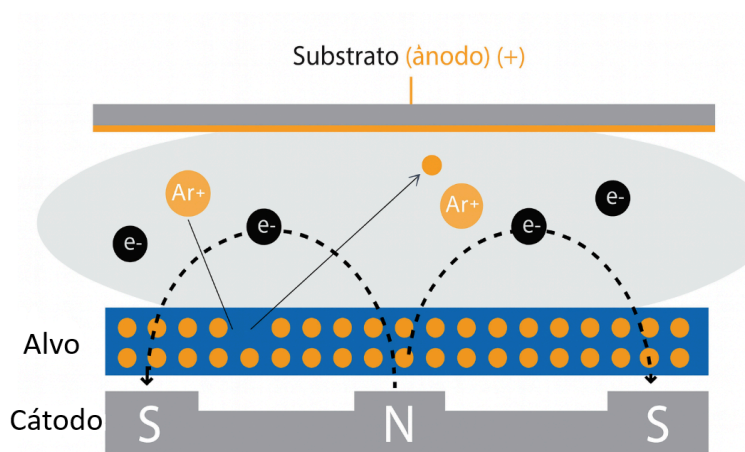
### 3.4 DEPOSIÇÃO DE FILMES BASEADA EM *MAGNETRON SPUTTERING*

#### 3.4.1 Fundamentos do Processo e Formação do Plasma

O *magnetron sputtering* é uma técnica de deposição física, amplamente empregada para a obtenção de filmes finos metálicos e dielétricos, especialmente em aplicações que demandam elevada pureza, uniformidade e adesão. O princípio do processo consiste na ejeção controlada de átomos de um alvo sólido, denominado *target*, por meio do bombardeamento iônico produzido por um plasma. Nesse ambiente, íons positivos de um gás inerte, geralmente argônio, são acelerados em direção ao alvo pela diferença de potencial aplicada entre o cátodo e o ânodo, colidindo com a superfície e transferindo momento suficiente para liberar átomos neutros. Esses átomos ejetados se deslocam através do meio rarefeito e se depositam sobre o substrato, formando uma camada sólida de espessura definida pelos parâmetros de deposição, como ilustrado na Figura 6 (TOMA, 2019).

A introdução de um campo magnético próximo à superfície do alvo distingue o processo magnetrônico das técnicas de *sputtering* convencionais. O *magnetron* cria um confinamento local de elétrons, forçando-os a descrever trajetórias espirais entre polos magnéticos opostos e aumentando a densidade de íons na região do plasma. Esse confinamento permite a manutenção da descarga em pressões muito baixas, da ordem de  $10^{-2}$  a  $10^{-3}$  mbar, o que reduz colisões indesejadas e resulta em um feixe mais direcional e energético. Dessa forma, o processo se torna mais eficiente, produzindo filmes de maior densidade, menor rugosidade e melhor adesão ao substrato (CHEN et al., 2021).

**Figura 6** – Esquema o processo de magnetron sputtering.

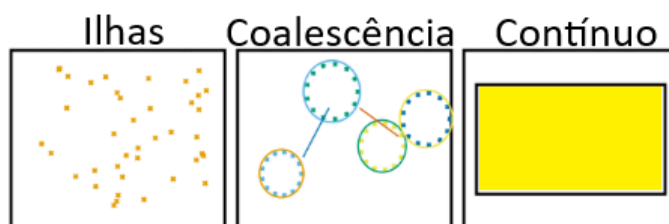


Fonte: Adaptado de DENTON VACUUM. [s.d]

### 3.4.2 Crescimento Morfológico e Continuidade Elétrica dos Filmes

Durante a deposição, a energia dos íons e a mobilidade superficial dos átomos determinam a microestrutura do filme. Em regimes de baixa energia, os átomos ejetados se fixam rapidamente, originando camadas porosas com baixa compactação. À medida que a potência de *sputtering* aumenta, a energia cinética transferida aos átomos adsorvidos intensifica a difusão superficial, promovendo a reorganização das ilhas metálicas em estruturas coalescentes. Esse processo de coalescência, se trata da junção progressiva de pequenas ilhas adjacentes até a formação de uma rede contínua, é fundamental para o estabelecimento de caminhos condutivos na superfície metálica. A sequência morfológica, apresentada na Figura 7, ilustra essa transição típica observada em filmes finos: o crescimento inicial em ilhas isoladas, seguido da união parcial entre elas, culminando em um filme contínuo e eletricamente conectado (COLIN et al., 2020).

**Figura 7** – Evolução morfológica do metal ultrafino. Sequência ilustrativa: ilhas → coalescência → filme contínuo.



Fonte: Adaptado de Colin et al. (2020).

O comportamento elétrico e a continuidade da camada metálica são fortemente influenciados pelos parâmetros de deposição. Em condições de baixa potência, a menor energia das espécies incidentes e a limitada mobilidade superficial favorecem a formação de filmes com maior densidade de descontinuidades e contornos de grão, resultando em elevada resistividade elétrica. Com o aumento da potência aplicada, ocorre incremento na energia efetiva das espécies e na difusão superficial, promovendo maior conectividade entre grãos, redução da rugosidade e aumento da densificação do filme. Como consequência, observa-se diminuição da resistividade e maior estabilidade das propriedades do filme ao longo do tempo (PANA et al., 2022).

### 3.5 ESTADO DA ARTE

Nesta seção, são apresentados artigos científicos selecionados como base técnica para o desenvolvimento experimental, com ênfase em metodologias de deposição por *magnetron sputtering* e propriedades elétricas.

#### 3.5.1 Deposição multicamada de Cu/SiN<sub>x</sub> por *magnetron sputtering*

O estudo de Pana et al. (2022) desenvolveu multicamadas SiN<sub>x</sub>/Cu/SiN<sub>x</sub> obtidas por *magnetron sputtering*, avaliando o efeito da polarização do substrato sobre a densificação e a estabilidade do Cu. O objetivo principal foi otimizar a microestrutura e a condutividade do Cu em empilhamentos dielétrico/condutor/dielétrico.

A deposição foi realizada em um sistema AJA-ATC-ORION equipado com cinco cátodos, utilizando *magnetron sputtering* RF para o SiN<sub>x</sub> e HiPIMS (*High Power Impulse Magnetron Sputtering*) para o Cu. As amostras foram produzidas sob atmosfera controlada Ar/N<sub>2</sub>, 8,5/1,5 sccm, com potências de 90 W para Si e polarização do substrato variando entre 0 e -100 V.

Os resultados mostraram que o aumento da tensão negativa de 100 V promoveu maior compactação dos grãos de Cu, elevação da densidade para 8,86 g·cm<sup>-3</sup>, próxima ao valor maciço, e redução da rugosidade superficial. Essa maior densificação indica melhor conectividade elétrica e menor resistência de contato entre camadas.

Conclui-se que a polarização controlada do substrato atua como parâmetro crítico para a formação de filmes metálicos densos e estáveis, fundamentais para a reprodutibilidade elétrica em estruturas MIM (PANA et al., 2022).

### 3.5.2 Propriedades elétricas de filmes Cu–SiN<sub>x</sub> depositados por *magnetron sputtering*

O trabalho de Beliaev et al. (2022) investigou as propriedades estruturais e elétricas de filmes Cu–SiN<sub>x</sub> obtidos por *magnetron sputtering* reativo, com foco na influência da espessura e da composição do dielétrico sobre a resistividade e continuidade elétrica.

As amostras foram produzidas em atmosfera Ar/N<sub>2</sub>, variando a fração de nitrogênio para gerar filmes *Si-rich* e *stoichiometric* (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), com espessuras entre 20 e 200 nm. A caracterização por MEV e DRX evidenciou que espessuras menores formam ilhas metálicas isoladas, enquanto valores acima de 40 nm originam filmes contínuos, caracterizando o limiar de percolação, ponto em que a rede metálica permite condução efetiva.

A resistividade elétrica caiu de 10<sup>4</sup> μΩ·cm, filmes descontínuos, para ≈ 3 μΩ·cm em filmes densos, comprovando a dependência direta entre microestrutura e condutividade. Filmes com maior teor de nitrogênio apresentaram maior barreira de potencial e resistividade, comportamento típico de isolantes com alta largura de banda proibida.

Esses resultados destacam a importância da espessura e composição do SiN<sub>x</sub> para o controle da continuidade e estabilidade elétrica em empilhamentos Cu/SiN<sub>x</sub>/Cu (BELIAEV et al., 2022).

### 3.5.3 Monitoramento in situ do crescimento de filmes metálicos ultrafinos

Colin et al. (2020) monitoraram em tempo real o crescimento de filmes de prata e Cu depositados por *magnetron sputtering* DC, correlacionando espessura, morfologia e resistividade elétrica durante a deposição.

O processo foi conduzido sob 3 mTorr de Ar, com espessuras de 1 a 30 nm e taxa de deposição controlada de aproximadamente 0,1 nm·s<sup>-1</sup>. As medições in situ de resistividade mostraram a transição de regime isolante para condutor entre 5 e 8 nm, ponto em que ocorre a percolação elétrica, o estabelecimento de um caminho contínuo para o transporte de carga.

A resistividade apresentou queda abrupta após a coalescência das ilhas metálicas, estabilizando-se quando o filme tornou-se contínuo. Esse comportamento confirma o modelo de crescimento Volmer–Weber, no qual os átomos se aglomeram em ilhas antes de formar o filme uniforme.

O estudo fornece dados quantitativos essenciais para definir a espessura crítica de condução em filmes metálicos, diretamente aplicável à otimização das camadas condutoras

do empilhamento Cu/SiN<sub>x</sub>/Cu. Os principais parâmetros experimentais para o Cu utilizados por Colin et al. (2020) estão resumidos na Tabela 1 (COLIN et al., 2020).

**Tabela 1** - Condições de deposição e espessuras características de transição morfológica para filmes metálicos depositados por magnetron *sputtering*.

| Elemento | Estrutura cristalina | Potência do alvo (W) | Taxa de deposição F (nm/s) | Espessura teórica (Th) | Espessura percentual (hperc) | Espessura contínua (hcont) |
|----------|----------------------|----------------------|----------------------------|------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Cu       | fcc                  | 30                   | 0,06                       | 0,22                   | 2,6±0,1                      | 8,2 ±0,1                   |

Fonte: Adaptado de COLIN et al. (2020).

### 3.5.4 União Cu–Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> por deposição multicamada ativa

O trabalho de Tatsumi et al. (2024) apresentou um método de união quase direta (*quasi-direct bonding*) entre Cu e nitreto de Si, utilizando camadas intermediárias de Ti/Al obtidas por *magnetron sputtering*. O objetivo foi aprimorar a adesão e a condução elétrica na interface Cu–Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> sem o uso de ligas de prata.

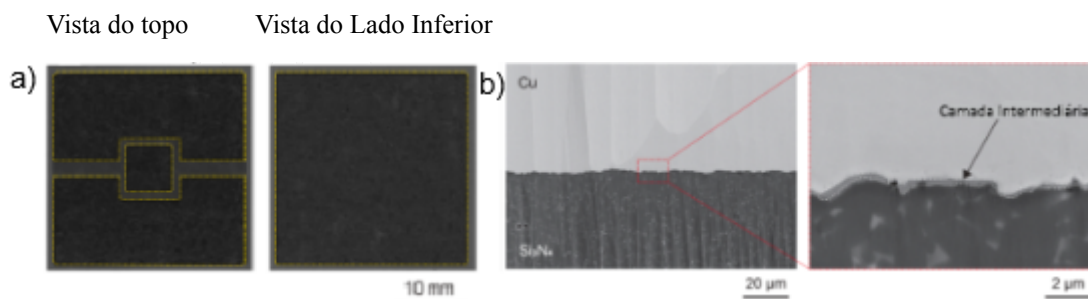
Durante o processo, as camadas de Ti e Al reagiram com o substrato cerâmico formando TiN e Cu–Al, que atuam como zonas de transição compatíveis em estrutura cristalina. Essa região de aproximadamente 300 nm assegura adesão e condutividade elétrica contínua entre o Cu e o Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

Os ensaios de ciclagem térmica de –40 a 200 °C mostraram estabilidade, com mínima delaminação após 600 ciclos. Simulações numéricas confirmaram que as tensões se concentram nas bordas metálicas devido à diferença de coeficiente de expansão térmica (CTE).

O estudo demonstra uma alternativa viável de deposição multicamada ativa para melhorar a integridade interfacial e a estabilidade elétrica em sistemas Cu/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, conforme Figura 8, contribuindo diretamente para a confiabilidade de estruturas MIM (TATSUMI et al., 2024).



**Figura 8** – Imagens do substrato Cu/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Cu fabricado: (a) imagens SAT das faces superior e inferior, com áreas de ligação delimitadas; (b) micrografias em corte transversal obtidas por SEM mostrando a interface Cu/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> e a camada intermediária.



Fonte: Adaptado de Tatsumi et al. (2024).

### 3.5.5 Revisão sobre filmes finos de nitreto de Si e nitreto de Si hidrogenado

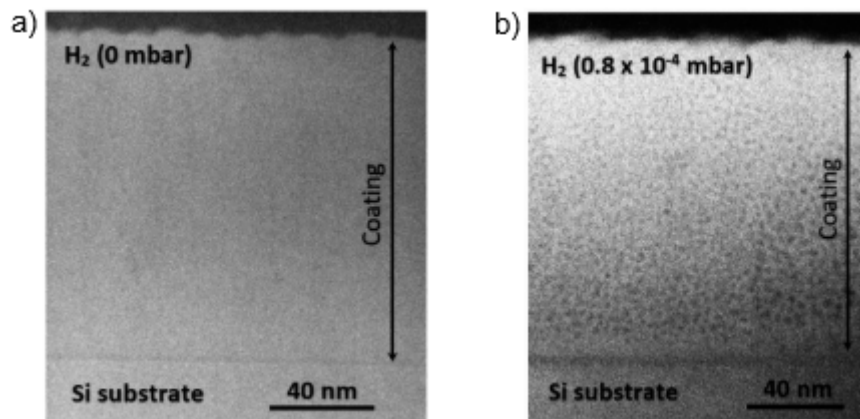
O estudo conduzido por Hegedüs et al (2021) apresenta uma revisão abrangente sobre a fabricação e aplicação de filmes finos de nitreto de Si e nitreto de Si hidrogenado, abordando as principais técnicas de deposição e as implicações nas propriedades estruturais, elétricas e físico-químicas dos filmes.

O trabalho descreve que os filmes de SiN<sub>x</sub> podem ser obtidos por diferentes rotas, destacando-se as técnicas químicas, CVD, PECVD, ECR-CVD, HW-CVD, e as físicas PVD e *magnetron sputtering*. Entre estas, a deposição física por *magnetron sputtering* é apontada como a mais adequada para filmes livres de hidrogênio, o que é crucial em aplicações elétricas, pois a presença de H pode alterar a resistividade e o comportamento dielétrico do material.

Em relação às propriedades obtidas, os autores observam que o controle da razão N/Si durante a deposição permite ajustar o índice de refração e a densidade do filme, influenciando diretamente o comportamento elétrico e a rigidez dielétrica. Além disso, o artigo destaca que o SiN<sub>x</sub> amorfo exibe propriedades variáveis conforme a energia de bombardeamento e a potência de magnetron sputtering, sendo possível atingir camadas compactas e estáveis a baixas temperaturas de substrato. Tais características tornam o processo PVD uma alternativa promissora para aplicações em camadas dielétricas e barreiras de difusão em estruturas MIM. A Figura 9 apresenta imagens obtidas por microscopia eletrônica de transmissão por varredura com detector anular de campo escuro de alto ângulo (*High-Angle Annular Dark-Field Scanning Transmission Electron Microscopy – HAADF-STEM*), técnica que permite analisar a microestrutura e as interfaces entre camadas com contraste relacionado ao

número atômico dos elementos presentes. As imagens evidenciam a diferença microestrutural entre camadas de  $\text{SiN}_x$  obtidas com e sem incorporação de hidrogênio, demonstrando a maior homogeneidade e densidade observadas nos filmes hidrogenados.

**Figura 9** – Imagens STEM de camadas de  $a\text{-SiN}_x$ : (a) filme sem hidrogênio e (b) filme  $a\text{-SiN}_x\text{:H}$ .



Fonte: Adaptado de Hegedüs et al. (2021).

### 3.5.6 Influência dos parâmetros de *sputtering* na condutividade de filmes metálicos

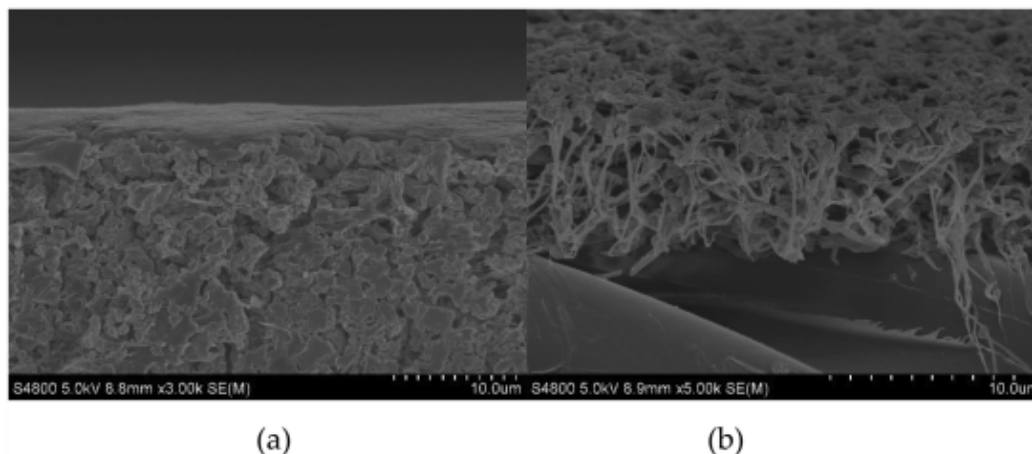
O estudo conduzido por Liu et al. (2023) investiga a influência dos parâmetros de deposição por *magnetron sputtering* sobre a condutividade elétrica de filmes metálicos finos, com foco na relação entre condições de processo e microestrutura resultante. Os autores analisam variáveis como potência de *magnetron sputtering*, pressão de trabalho, tempo de deposição e fluxo de gás argônio, demonstrando que esses parâmetros exercem papel direto na uniformidade, taxa de crescimento e propriedades elétricas do filme.

Os resultados indicam que a redução da pressão de trabalho e o aumento da potência aplicada favorecem a obtenção de filmes mais densos e homogêneos, devido ao aumento da energia das espécies incidentes e da mobilidade superficial dos átomos. O tempo de deposição também se mostra um parâmetro relevante, uma vez que influencia diretamente a espessura do filme e o grau de coalescência das ilhas metálicas, impactando a formação de caminhos condutivos contínuos.

Além disso, o estudo aponta que a condutividade elétrica está diretamente associada à qualidade microestrutural do filme, sendo maximizada em condições que promovem maior conectividade entre grãos e menor presença de defeitos estruturais. A análise por microscopia

eletrônica de varredura evidencia diferenças significativas na morfologia dos filmes obtidos sob diferentes condições de deposição, conforme ilustrado na Figura 10.

**Figura 10** – Imagens de MEV de uma liga Cu-estanho obtidas por sputtering: (a) superfície com menor magnificação e (b) superfície com maior magnificação.



Fonte: Adaptado de Liu et al. (2023).

### 3.5.7 Influência da adição de SiC em ligas à base de Cu

O estudo realizado por Hammadi et al. (2022) investiga o efeito da adição de partículas de SiC nas propriedades microestruturais e mecânicas de ligas com matriz de Cu, analisando diferentes concentrações do reforço cerâmico e influência no comportamento do material. Os autores avaliam amostras contendo diferentes teores de SiC, com o objetivo de compreender a relação entre composição, microestrutura e propriedades finais.

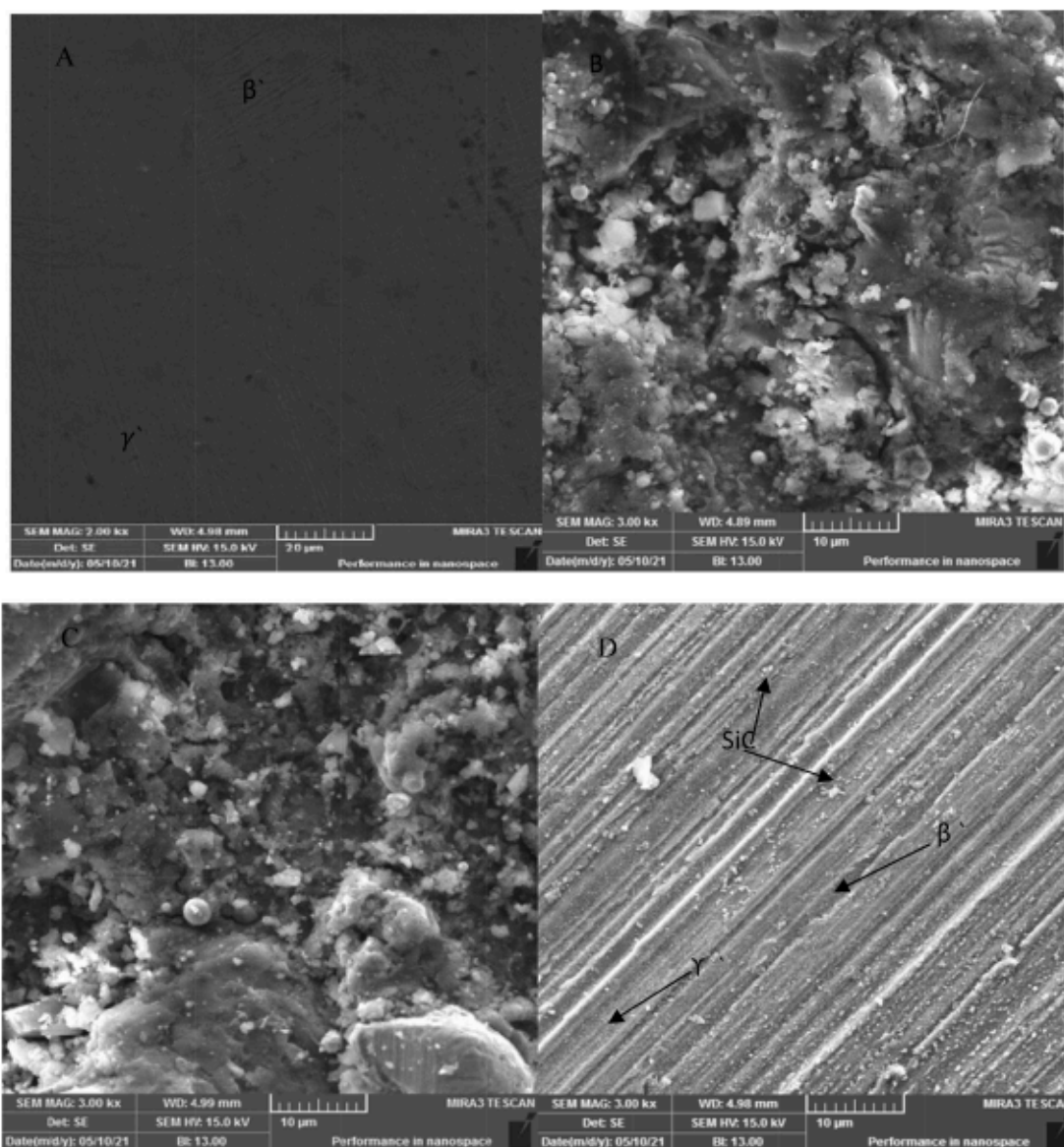
Os resultados indicam que a incorporação de SiC promove alterações significativas na microestrutura da liga, influenciando a formação de fases e a distribuição dos constituintes. A presença das partículas cerâmicas contribui para o aumento da dureza e para a redução da taxa de desgaste, evidenciando o papel do SiC como elemento de reforço estrutural na matriz metálica. Esse comportamento está associado à elevada rigidez, estabilidade térmica e resistência mecânica do SiC.

A análise por MEV evidencia a modificação da morfologia da superfície com o aumento da fração de SiC, conforme apresentado na Figura 11. Observa-se que a amostra sem adição de SiC apresenta uma microestrutura mais homogênea, enquanto as amostras com adição progressiva de 0,5% e 1% de SiC apresentam maior heterogeneidade e presença de partículas dispersas. Para a amostra com 3% de SiC, verifica-se uma distribuição mais

pronunciada das partículas e alterações mais evidentes na topografia superficial, indicando maior interação entre matriz e fase cerâmica.

Embora o estudo seja voltado para ligas metálicas reforçadas, os resultados são relevantes para a compreensão do comportamento do SiC em sistemas contendo Cu, especialmente no que se refere à influência da microestrutura e da distribuição de fases nas propriedades do material.

**Figura 11** – Micrografias de MEV de ligas à base de Cu com diferentes teores de SiC: (a) amostra base sem adição de SiC; (b) adição de 0,5% de SiC; (c) adição de 1% de SiC; (d) adição de 3% de SiC.



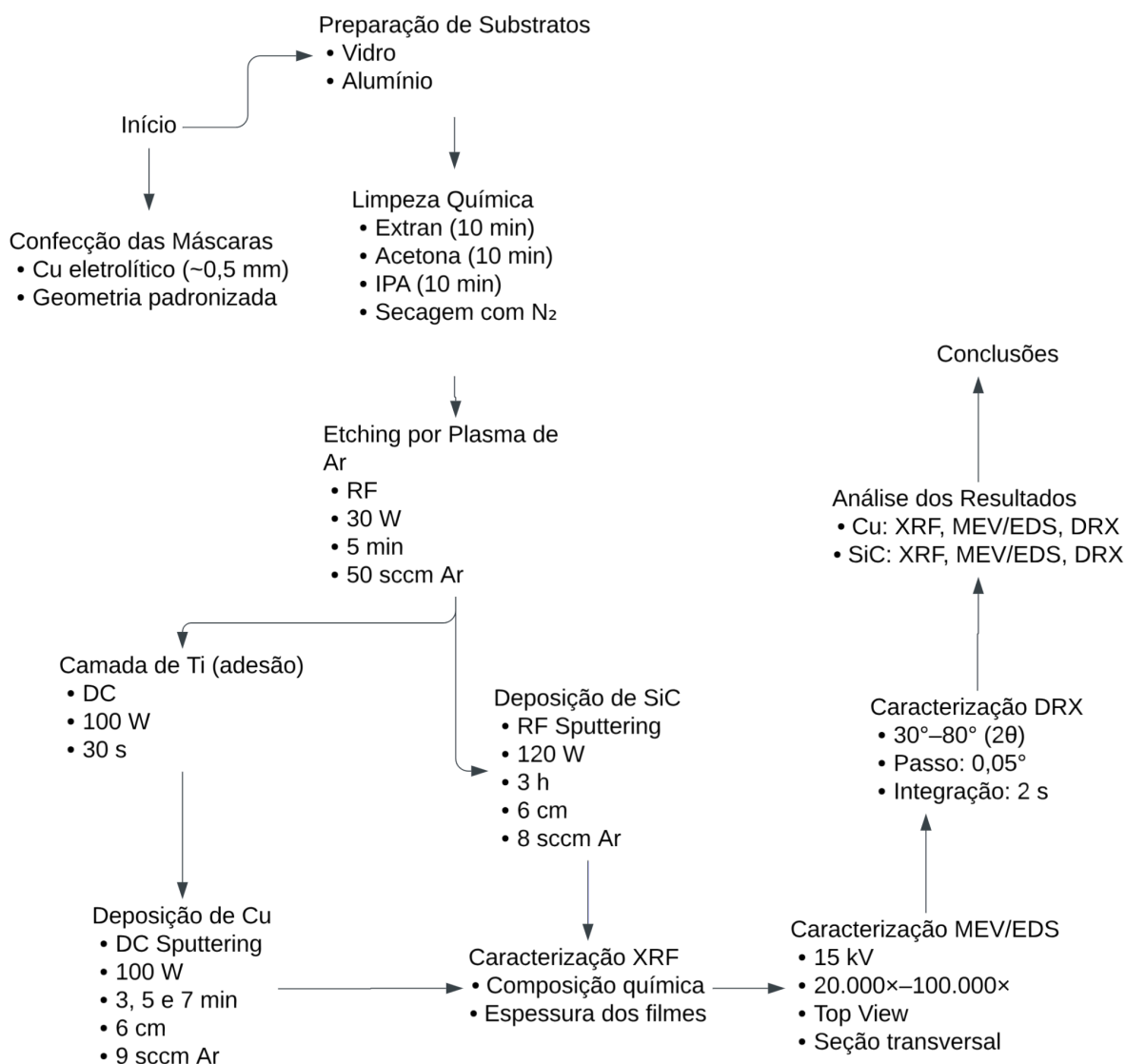
Fonte: Adaptado de Hammadi et al. (2022).

A revisão bibliográfica evidenciou que as propriedades morfológicas, composicionais e estruturais de filmes finos obtidos por magnetron sputtering dependem diretamente das condições de deposição e do material empregado. Os estudos analisados abordam predominantemente sistemas envolvendo Cu, SiN<sub>x</sub> e SiC. Nesse contexto, este trabalho contribui para a área ao caracterizar filmes finos de Cu e SiC obtidos por PVD quanto à morfologia, composição química e estrutura cristalina, possibilitando correlacionar as condições de deposição com as características dos filmes produzidos. Espera-se, assim, ampliar o entendimento sobre a formação dessas camadas e fornecer informações que possam orientar estudos futuros envolvendo filmes finos metálicos e cerâmicos produzidos por PVD.

## 4. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo foi organizada em etapas sequenciais, compreendendo a preparação dos substratos, o desenvolvimento e a construção das máscaras metálicas, a deposição controlada dos filmes de Cu e SiC por técnicas de *magnetron sputtering* e a posterior caracterização morfológica, composicional e estrutural das amostras. As etapas experimentais foram conduzidas de forma a garantir a reprodutibilidade dos processos, a rastreabilidade dos parâmetros de deposição e a adequada correlação entre as condições empregadas e as características dos filmes obtidos. O fluxograma das atividades desenvolvidas é apresentado na Figura 12.

**Figura 12** – Fluxograma das etapas experimentais do estudo.



Fonte: Autor (2026).

#### 4.1 PREPARAÇÃO DO SUBSTRATO, DESIGN E CONSTRUÇÃO DAS MÁSCARAS

Os substratos de vidro foram manuseados com pinças e luvas para evitar contaminações. A limpeza seguiu sequência padronizada em lavadora ultrassônica Unique Ultra Cleaner, equipada com controle digital de tempo e temperatura, mantendo o banho a aproximadamente 30 °C. Inicialmente, as amostras foram imersas em solução detergente (Extran 5%) por 10 minutos, seguida de enxágue em água deionizada. Em seguida, foi realizado banho em acetona por 10 minutos, também com posterior enxágue em água deionizada. Por fim, os substratos foram submetidos a banho em álcool isopropílico por 10 minutos, seguido de enxágue em água deionizada. Após o processo de limpeza, as amostras foram secas com fluxo de nitrogênio e armazenadas em ambiente controlado até o momento da deposição (OHRING, 2002).

As máscaras de deposição foram projetadas em software editor de imagens em escala 1:1 para delimitar as regiões de deposição e os traços de medição elétrica. Foram definidas dimensões nominais de 60 mm x 24 mm, com dois contatos circulares de 10 mm de diâmetro conectados por uma trilha central de 4 mm de largura, separados por 30 mm de espaçamento entre centros, de modo a compensar eventuais variações decorrentes do sombreamento característico do processo de deposição e garantir a repetibilidade no posicionamento sobre os substratos de vidro.

As máscaras foram confeccionadas em Cu eletrolítico de alta pureza (espessura ~0,5 mm), cortadas por fresagem de precisão. As bordas foram lixadas e polidas para eliminar rebarbas e evitar falhas de contato. Após o corte, as peças foram limpas com álcool isopropílico e armazenadas em envelopes individualizados para evitar oxidação e contaminação superficial.

#### 4.2 PREPARAÇÃO PARA AS DEPOSIÇÕES

Antes da deposição dos filmes, os substratos foram submetidos a um tratamento de superfície por plasma de argônio (*etching*), com o objetivo de remover contaminantes adsorvidos e promover a ativação superficial. O processo foi realizado com potência de 30 W durante 5 minutos, utilizando fluxo de argônio de 50 sccm, sob pressão de base da ordem de  $10^{-6}$  mbar.

Com o objetivo de aumentar a adesão dos filmes metálicos ao substrato, foi depositada uma fina camada de Ti previamente à deposição do Cu. A deposição foi realizada por *magnetron sputtering* DC, utilizando alvo de Ti em atmosfera de argônio, potência de 100 W e tempo de deposição de 30 segundos. A camada de Ti atuou como camada intermediária de adesão entre o substrato e o filme metálico subsequente, contribuindo para a estabilidade e continuidade das camadas depositadas.

#### 4.3 PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO DO Cu

A deposição dos filmes de Cu foi realizada por *magnetron sputtering* DC em câmara de vácuo, utilizando argônio como gás de plasma. O sistema operou com pressão de base de aproximadamente  $1,8 \times 10^{-6}$  mbar. As deposições foram conduzidas com potência de 100 W, distância alvo–substrato de 6 cm e fluxo de argônio de 9 sccm.

Foram produzidas amostras com tempos de deposição de 3, 5 e 7 minutos, com o objetivo de avaliar a influência do tempo de deposição sobre a espessura, a morfologia superficial, a composição química e a estrutura cristalina dos filmes obtidos.

Após a deposição, as amostras foram caracterizadas por XRF, MEV, EDS e DRX. As condições de deposição foram definidas com base em trabalhos reportados na literatura para obtenção de filmes finos de Cu por *magnetron sputtering*, como os estudos de Pana et al. (2022) e Colin et al. (2020).

#### 4.4 PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO DO SiC

A deposição do SiC foi realizada por *magnetron sputtering* RF em câmara de vácuo, utilizando argônio como gás de plasma. Inicialmente, os substratos de Al foram submetidos a *etching*, empregando potência de 30 W durante 5 minutos e fluxo de argônio de 50 sccm, com o objetivo de remover contaminantes superficiais e promover a ativação da superfície antes da deposição.

Após a etapa de limpeza por plasma, foi realizada a deposição do filme de SiC utilizando alvo de SiC operando em potência de 120 W RF. A deposição foi conduzida durante 3 horas, mantendo-se distância alvo–substrato de 6 cm e fluxo de argônio de 8 sccm.



Durante o processo, as espécies ejetadas do alvo foram transportadas pelo plasma e depositadas sobre a superfície do substrato, formando o filme fino.

As condições de deposição foram definidas com base em parâmetros típicos empregados na deposição de materiais cerâmicos por *magnetron sputtering* RF, visando obter filmes contínuos e adequados para posterior caracterização morfológica, composicional e estrutural (OHRING, 2002; WESCH, 1996).

#### 4.5 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA, COMPOSICIONAL E ESTRUTURAL

A caracterização morfológica dos filmes foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando um microscópio TESCAN MIRA3, equipado com detector de espectroscopia por dispersão de energia (EDS) Oxford Instruments X-Max<sup>n</sup> 50, operando com tensão de aceleração de 10 kV. Foram obtidas micrografias em vista superior das superfícies depositadas e, para algumas amostras, imagens de seção transversal, empregando magnificações entre 20.000× e 100.000×. Essas análises permitiram avaliar a morfologia dos filmes, a continuidade, a presença de defeitos superficiais e a interface com o substrato. A composição química das amostras foi analisada por EDS, possibilitando a identificação dos elementos presentes e a confirmação da deposição das camadas de Cu e SiC.

Para a determinação da espessura dos filmes de Cu por MEV, foram obtidas imagens de seção transversal e realizadas quatro medições distribuídas ao longo da camada depositada. Para as amostras em que a geometria da seção transversal não permitiu quatro determinações confiáveis, foram realizadas três medições. A espessura final de cada amostra foi obtida pela média aritmética das medições, sendo o desvio padrão utilizado para avaliar a dispersão dos resultados.

Adicionalmente, foi empregada a técnica de fluorescência de raios X (XRF), utilizando um espectrômetro Shimadzu EDX-7000, para determinação da composição química e estimativa da espessura dos filmes depositados. O método baseia-se na emissão de radiação característica após a excitação dos átomos por uma fonte de raios X, permitindo identificar os elementos presentes e estimar quantitativamente a espessura das camadas. As análises foram realizadas de forma não destrutiva, preservando a integridade das amostras.

A caracterização estrutural dos filmes foi realizada por difração de raios X (DRX), utilizando um difratômetro Shimadzu XRD-6000, com o objetivo de identificar fases cristalinas e avaliar o grau de cristalinidade dos materiais depositados. Os ensaios foram conduzidos na faixa angular de 30° a 80° (2θ), utilizando passo de 0,05° e tempo de

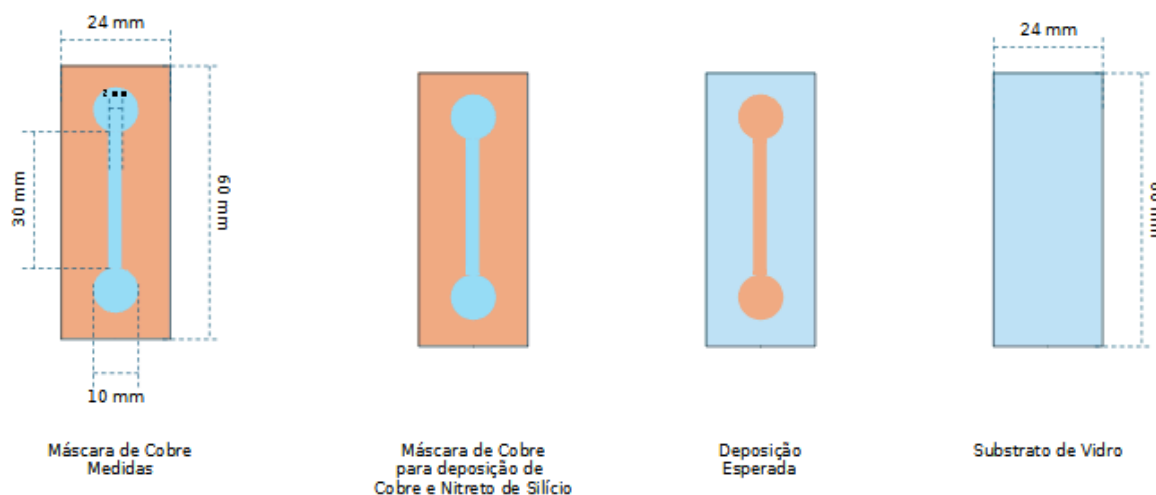
integração de 2 s por passo. Os difratogramas obtidos foram analisados por meio da comparação dos picos de difração com padrões cristalográficos disponíveis na literatura e em bancos de dados de referência, permitindo a identificação das fases presentes e a avaliação da estrutura cristalina dos filmes.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CONFEÇÃO DAS MÁSCARAS

Com o objetivo de padronizar as regiões de deposição e garantir a repetibilidade entre as amostras produzidas, foram desenvolvidas máscaras metálicas para utilização durante os processos de deposição. A Figura 13 apresenta o planejamento utilizado para a confecção das máscaras e a geometria prevista para a deposição sobre os substratos. Essa configuração foi adotada com o objetivo de delimitar as regiões de deposição e minimizar possíveis variações associadas ao sombreamento característico do processo de *magnetron sputtering*, permitindo a obtenção de geometrias reproduzíveis para as etapas de caracterização.

**Figura 13** – Planejamento dimensional das máscaras utilizadas nas deposições e representação esquemática da deposição esperada sobre o substrato.



Fonte: Autor (2026).

A Figura 14 apresenta uma das máscaras confeccionadas e utilizadas durante as deposições realizadas neste trabalho.

**Figura 14** – Máscara de cobre confeccionada e utilizada durante as deposições dos filmes finos.



Fonte: Autor (2026).

A utilização dessas máscaras permitiu delimitar as regiões de deposição e obter geometrias reproduzíveis entre as diferentes amostras produzidas, contribuindo para a comparação dos resultados de espessura, morfologia, composição química e estrutura dos filmes depositados.

5.2 LIMPEZA, ETCHING E DEPOSIÇÃO DE TI

Os resultados obtidos por fluorescência de raios X (XRF) confirmaram a presença da camada de Ti em todas as amostras analisadas. Os valores apresentados na Tabela 2 correspondem à média de duas medições realizadas para cada condição experimental, acompanhadas do respectivo desvio padrão.

**Tabela 2** - Resultados obtidos por XRF para a deposição de Ti

| Identificação | Espessura Ti (nm) |
|---------------|-------------------|
| 3 min         | 5,75 ± 0,24       |
| 5 min         | 5,75 ± 0,24       |
| 7 min         | 7,38 ± 1,20       |

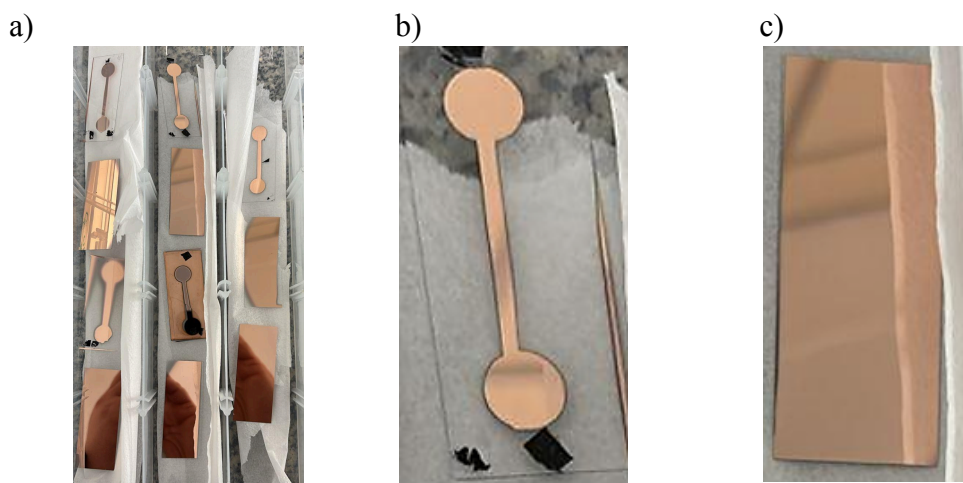
Fonte: Autor (2026).

As espessuras médias obtidas para a camada de Ti permaneceram inferiores a 10 nm, situando-se na faixa normalmente empregada para camadas de adesão ultrafinas depositadas por magnetron sputtering (OHRING, 2002; MATTOX, 2010). O Ti é amplamente utilizado como camada intermediária entre o substrato de vidro e o filme de Cu devido à sua elevada afinidade química, favorecendo a adesão sem alterar significativamente as propriedades do filme metálico principal. Camadas muito espessas influenciam as propriedades elétricas e morfológicas do sistema, enquanto espessuras nanométricas, como as obtidas neste trabalho, permitem melhorar a adesão sem alterar significativamente o comportamento condutivo do filme metálico principal (OHRING, 2002; MATTOX, 2010).

### 5.3 DEPOSIÇÃO DE COBRE

A Figura 16 apresenta as amostras de vidro após as deposições de Cu realizadas neste trabalho. Observa-se, na Figura 16-b, a formação da geometria previamente definida pelas máscaras de deposição, evidenciando a delimitação das regiões recobertas pelo filme metálico. Também foram produzidas amostras sem a utilização de máscaras, apresentadas na Figura 16-c, destinadas às etapas de caracterização. Na Figura 16-a, as amostras localizadas à esquerda correspondem ao tempo de deposição de 3 minutos, as centrais a 5 minutos e as localizadas à direita a 7 minutos.

**Figura 16** – Amostras obtidas após a deposição de Cu por magnetron sputtering DC: (a) conjunto das amostras depositadas nos tempos de 3, 5 e 7 min; (b) amostra depositada durante 5 min utilizando máscara de deposição; (c) amostra depositada durante 5 min sem utilização de máscara.



Fonte: Autor (2026).

Visualmente, todas as amostras apresentaram boa aderência do filme de Cu ao substrato de vidro, não sendo observados indícios de destacamento, descascamento ou delaminação após a deposição. Os filmes apresentaram aspecto contínuo e homogêneo em todas as condições avaliadas, evidenciando que a etapa de preparação superficial, o tratamento por etching e a camada intermediária de Ti foram eficazes em promover a adesão do Cu ao substrato. Além disso, a utilização das máscaras permitiu a obtenção de geometrias bem definidas, com boa delimitação entre as regiões recobertas e não recobertas pelo filme metálico.

### 5.3.1 Fluorescência de Raios X do Cu

Os valores médios obtidos para cada condição de deposição são apresentados na Tabela 3, acompanhados dos respectivos desvios padrão. Os resultados individuais das medições de XRF, utilizados para o cálculo das médias são apresentados no Apêndice A.

**Tabela 3** - Resultados obtidos por XRF para a deposição de Cu

| <b>Identificação</b> | <b>Espessura Cu (nm)</b> |
|----------------------|--------------------------|
| 3 min                | $193 \pm 23$             |
| 5 min                | $283 \pm 12$             |
| 7 min                | $336 \pm 57$             |

Fonte: Autor (2026).

Os resultados demonstram aumento progressivo da espessura média do Cu com o aumento do tempo de deposição, passando de aproximadamente 193 nm para 336 nm entre as amostras depositadas durante 3 e 7 minutos. Esse comportamento é esperado em processos de magnetron sputtering, pois, mantendo-se constantes os demais parâmetros de deposição, o aumento do tempo de exposição do substrato ao fluxo de espécies ejetadas do alvo resulta em maior quantidade de material depositado sobre a superfície.

A tendência observada está de acordo com os resultados reportados por Colin et al. (2020), que verificaram aumento da espessura e da continuidade de filmes metálicos à medida que o processo de deposição era prolongado. De forma semelhante, Pana et al. (2022) observaram que o aumento do tempo de magnetron sputtering resulta em maior quantidade de

material depositado, favorecendo a formação de filmes com maior espessura e continuidade superficial.

### 5.3.2 MEV e EDS do Cu

As análises por MEV foram realizadas com o objetivo de avaliar a morfologia superficial dos filmes de Cu depositados por magnetron sputtering, bem como observar a continuidade da camada formada sobre o substrato. As espessuras apresentadas na Tabela 4 correspondem às médias das medições realizadas nas micrografias de seção transversal de cada condição experimental, acompanhadas dos respectivos desvios padrão.

**Tabela 4** - Resultados obtidos por MEV para a deposição de Cu

| Identificação | Espessura Cu (nm) |
|---------------|-------------------|
| 3 min         | $313 \pm 25$      |
| 5 min         | $443 \pm 38$      |
| 7 min         | $526 \pm 26$      |

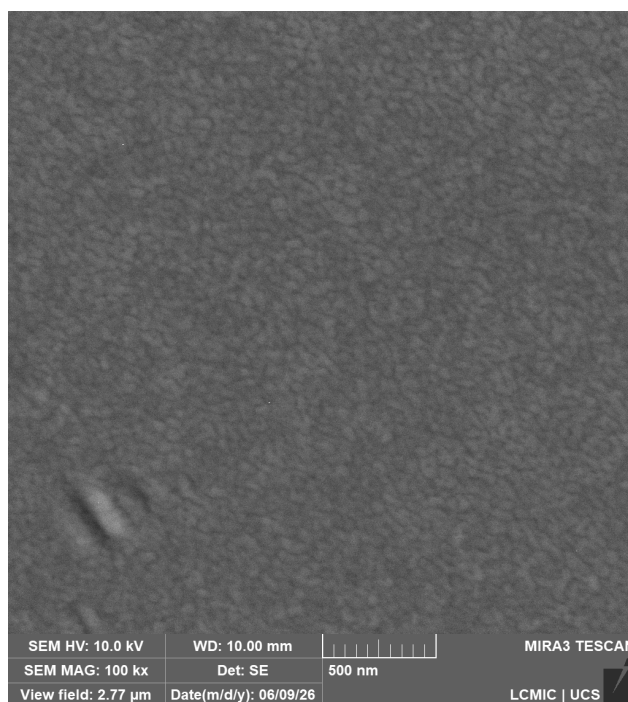
Fonte: Autor (2026).

As micrografias mais representativas das análises realizadas são apresentadas nesta seção. Imagens complementares obtidas para as amostras depositadas durante 3, 5 e 7 minutos, que não foram incluídas no corpo principal do texto para evitar repetição de informações, são apresentadas no Apêndice C. Essas imagens também foram avaliadas e utilizadas na interpretação dos resultados discutidos a seguir.

A Figura 17 apresenta a micrografia da superfície do filme de Cu depositado por *magnetron sputtering*. Observa-se a formação de uma camada contínua sobre o substrato, sem evidências de regiões extensas sem deposição. A superfície apresenta morfologia granular relativamente homogênea, característica de filmes metálicos obtidos por *magnetron sputtering*, sendo composta por aglomerados finos associados ao crescimento e à coalescência das ilhas formadas durante os estágios iniciais da deposição. Esse comportamento é consistente com o mecanismo de crescimento descrito por Colin et al. (2020), no qual núcleos inicialmente isolados evoluem progressivamente para uma camada contínua à medida que ocorre o aumento da quantidade de material depositado. A distribuição

uniforme das estruturas observadas sugere que as condições de deposição empregadas favoreceram a formação de um filme com cobertura superficial contínua.

**Figura 17** – Micrografia da superfície do filme de Cu de 3 min depositado por magnetron sputtering (100.000×).

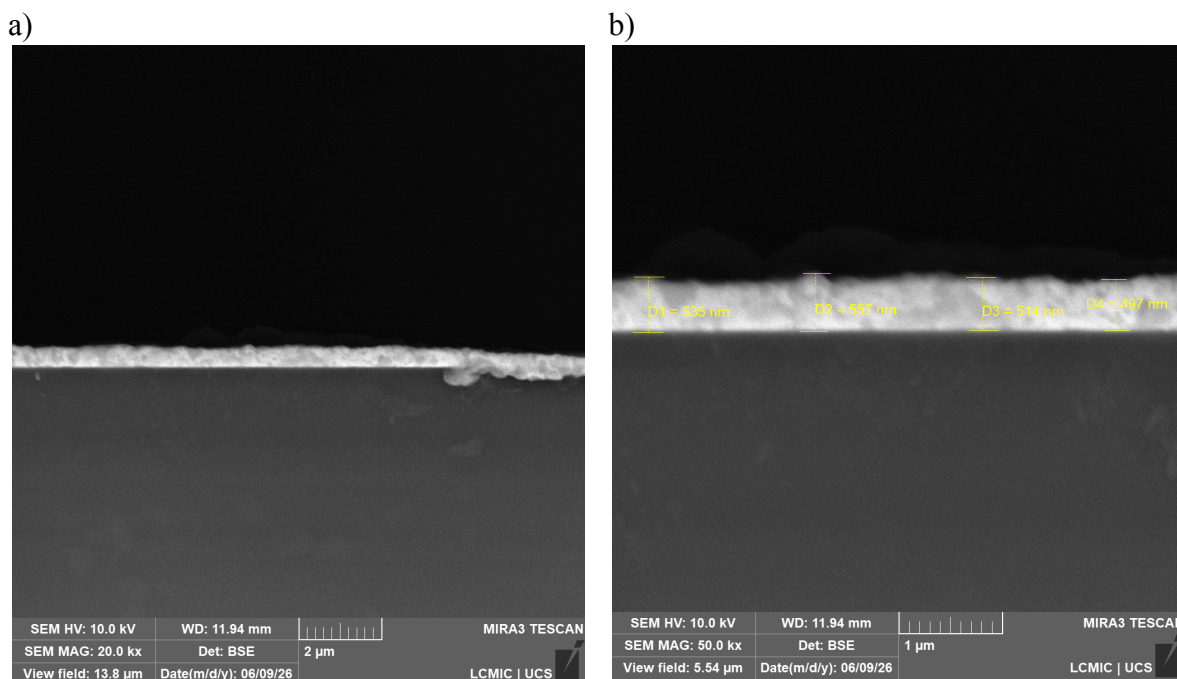


Fonte: Autor (2026).

A Figura 18-a apresenta a micrografia de seção transversal da amostra de Cu depositada durante 7 minutos. É possível observar a formação de uma camada contínua sobre o substrato vítreo, com interface bem definida entre o filme depositado e o substrato. As medições realizadas indicaram espessura média na faixa de centenas de nanômetros, corroborando os resultados obtidos por fluorescência de raios X, conforme Figura 18-b. Além disso, não foram observadas evidências de destacamento, trincas ou descontinuidades significativas na interface analisada, sugerindo adequada adesão do filme ao substrato. A morfologia da camada observada na seção transversal está de acordo com o comportamento esperado para filmes metálicos depositados por *magnetron sputtering* após o estabelecimento da coalescência das ilhas metálicas, resultando na formação de uma estrutura contínua e eletricamente conectada (COLIN et al., 2020).



**Figura 18** – Micrografia da seção do filme de Cu de 7 min depositado por magnetron sputtering: a) 20.000 $\times$ ; b) 50.000 $\times$  com medidas.



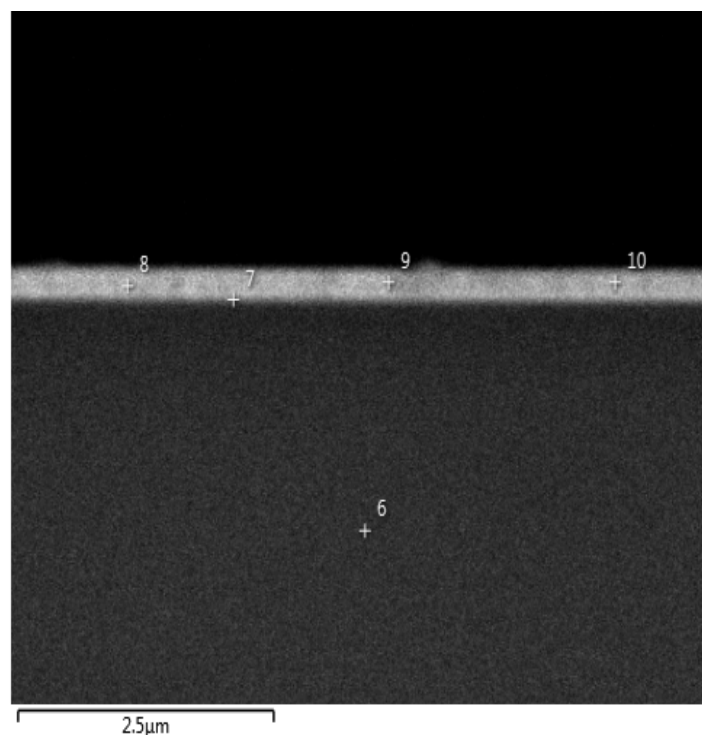
Fonte: Autor (2026).

As espessuras determinadas por MEV apresentaram valores sistematicamente superiores aos obtidos por XRF. Observou-se que a razão entre os resultados das duas técnicas permaneceu aproximadamente constante para todas as amostras analisadas, variando entre 1,56 e 1,62, correspondendo a diferenças relativas entre 56% e 62%. Esse comportamento sugere a influência de um fator geométrico associado à preparação da amostra para observação em seção transversal. Devido à reduzida espessura do substrato de vidro, não foi possível realizar um corte metalográfico convencional, sendo a avaliação efetuada em regiões obtidas por fratura. Nessas condições, a inclinação local da superfície analisada pode resultar em superestimação sistemática da espessura observada por MEV, enquanto a técnica de XRF fornece uma medida média da espessura sobre uma área significativamente maior da amostra. Dessa forma, os resultados obtidos pelas duas técnicas foram considerados complementares na avaliação dos filmes depositados (OHRING, 2002).

A caracterização composicional foi realizada por EDS, acoplada ao MEV. A Figura 19 apresenta a micrografia de seção transversal da amostra depositada durante 5 minutos, indicando os pontos selecionados para análise química. O ponto 6 foi posicionado na região correspondente ao substrato, o ponto 7 foi localizado próximo à interface entre o substrato e o

filme depositado, enquanto os pontos 8, 9 e 10 foram analisados ao longo da camada depositada.

**Figura 19** – Micrografia de seção transversal da amostra de Cu depositada durante 5 minutos, indicando os pontos utilizados para análise por EDS.



Fonte: Autor (2026).

Os espectros obtidos nos pontos 7 e 9 são apresentados nas Figuras 20-a e 20-b, respectivamente, enquanto os espectros referentes aos pontos 6, 8 e 10 e os das amostras de 7 e 3 minutos são apresentados no Apêndice B. Embora não estejam incluídos no corpo principal do texto, esses espectros foram igualmente avaliados e utilizados na interpretação dos resultados.

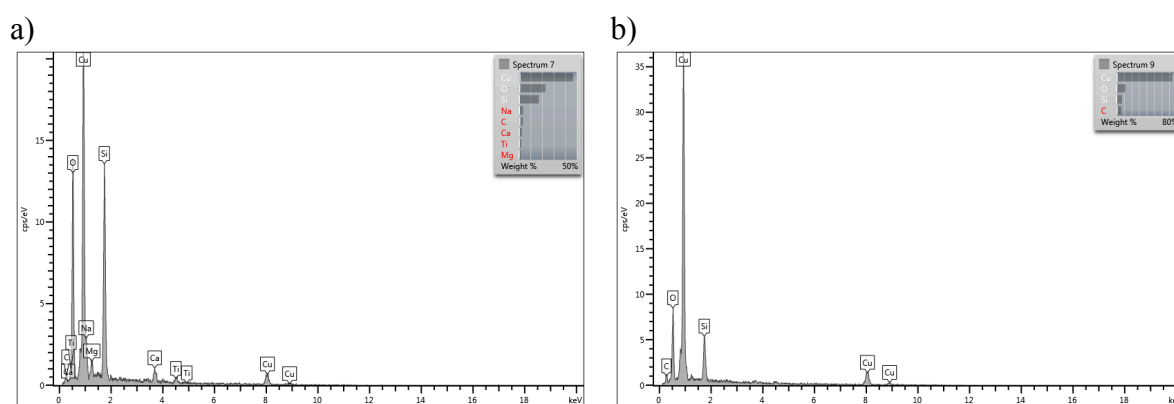
O espectro referente ao ponto 6 apresentou predominância de O, Si, Na, Ca e Mg, elementos característicos da composição do vidro soda-cal utilizado como substrato. A ausência de picos significativos de Cu nessa região confirma que a análise foi realizada fora da camada metálica, validando a distinção observada na micrografia de seção transversal.

O espectro obtido no ponto 7 evidenciou a presença predominante de Cu, acompanhada por sinais de Ti, Si, O, Na, Ca e Mg. A detecção de Ti nessa região está associada à proximidade da interface entre o substrato e o filme metálico, confirmando a presença da camada de adesão depositada previamente ao cobre. Os demais elementos

identificados são compatíveis com a composição do substrato de vidro e com o volume de interação do feixe eletrônico durante a análise.

Por outro lado, os espectros obtidos nos pontos 8, 9 e 10 evidenciaram a predominância de Cu, confirmando a composição química esperada para o filme depositado. Além dos picos característicos de Cu, foram observados sinais de oxigênio e Si em menor intensidade, bem como traços de sódio, cálcio e magnésio em algumas regiões. A presença desses elementos pode ser atribuída à contribuição do substrato para o volume de interação do feixe eletrônico, uma vez que a espessura do filme encontra-se na faixa de centenas de nanômetros.

**Figura 20** – Espectro EDS: a) ponto 7; b) ponto 9.



Fonte: Autor (2026).

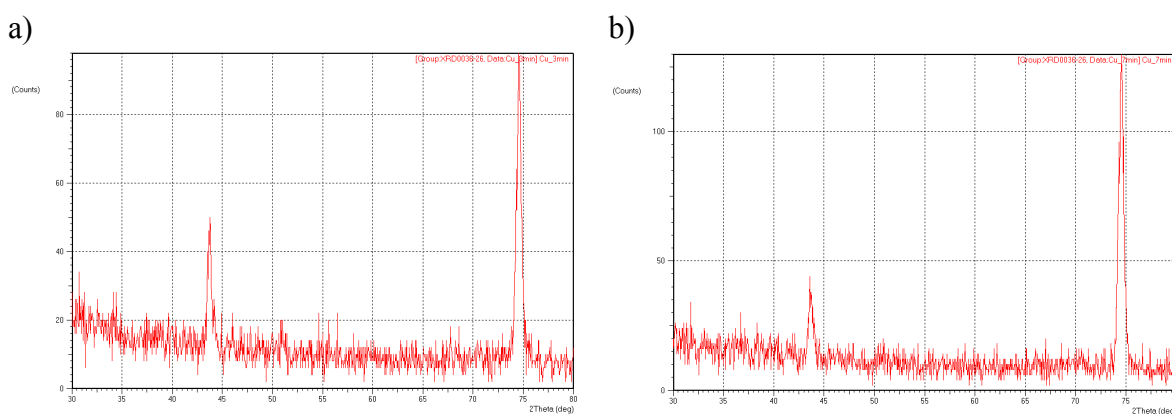
A presença de oxigênio nos espectros pode estar relacionada tanto aos óxidos constituintes do substrato vítreo quanto à formação de uma fina camada superficial de óxido de Cu decorrente da exposição da amostra ao ambiente após a deposição. Esse comportamento é frequentemente observado em filmes metálicos de Cu e não compromete a identificação da camada depositada.

De modo geral, as análises de MEV e EDS demonstraram que os parâmetros de deposição empregados foram capazes de produzir filmes de Cu contínuos, aderentes ao substrato e com composição química compatível com a estrutura proposta. Esses resultados estão em concordância com os mecanismos de crescimento e coalescência reportados para filmes metálicos obtidos por *magnetron sputtering* (COLIN et al., 2020; PANA et al., 2022).

### 5.3.3 Difração de Raios X do Cu

As Figuras 21-a e 21-b apresentam os difratogramas das amostras de Cu depositadas durante 3 e 7 minutos, respectivamente. Em ambas as condições foram observados picos de difração próximos de  $43^\circ$  e  $74^\circ$  ( $2\theta$ ), atribuídos aos planos cristalográficos (111) e (220) do Cu metálico com estrutura cúbica de face centrada, em concordância com a ficha cristalográfica ICDD PDF 04-0836. A presença desses picos confirma a formação de Cu cristalino sobre a superfície dos substratos.

**Figura 21** – Difratograma da amostra de Cu: a) 3 min; b) 7 min.



Fonte: Autor (2026).

Comparando os dois difratogramas, observa-se a presença das mesmas reflexões cristalográficas características do Cu metálico, indicando que a estrutura FCC foi mantida independentemente do tempo de deposição utilizado. Além disso, o pico localizado em aproximadamente  $74^\circ$  apresentou intensidade superior à observada para o pico em  $43^\circ$ , sugerindo a existência de orientação preferencial dos cristalitos formados durante o processo de deposição. Esse comportamento é frequentemente observado em filmes finos produzidos por *magnetron sputtering*, nos quais os parâmetros de deposição influenciam diretamente o crescimento cristalino e a textura do material.

Os resultados obtidos são compatíveis com os mecanismos de crescimento e densificação de filmes metálicos depositados por *magnetron sputtering* discutidos por Pana et al. (2022) e Colin et al. (2020). No presente trabalho, os difratogramas apresentaram picos em aproximadamente  $43^\circ$  e  $74^\circ$  ( $2\theta$ ), atribuídos aos planos cristalográficos (111) e (220) do Cu metálico com estrutura cúbica de face centrada, conforme a identificação realizada por comparação com a ficha cristalográfica utilizada na análise. Além disso, não foram

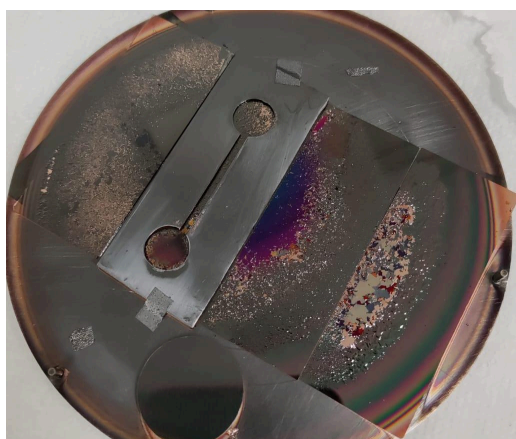
identificados picos adicionais associados a óxidos de Cu ou outras fases secundárias, indicando que as camadas depositadas são predominantemente constituídas por Cu metálico.

Não foi possível realizar a análise por difração de raios X da amostra depositada durante 5 minutos devido às limitações dimensionais da amostra disponível para ensaio. Dessa forma, a caracterização estrutural foi conduzida utilizando as amostras de 3 e 7 minutos, representando as condições de menor e maior tempo de deposição investigadas neste trabalho.

#### 5.4 DEPOSIÇÃO DE CARBETO DE SILÍCIO

Houve deposição satisfatória apenas para a amostra contendo substrato de Al associado ao SiC como mostrado na Figura 22 onde o SiC não conseguiu aderir sobre o substrato, tanto de Cu como de vidro.

*Figura 22 – Deposição do SiC.*



Fonte: Autor (2026).

##### 5.4.1 Fluorescência de Raios X do SiC

Os resultados obtidos por XRF, confirmaram a presença de Si sobre o substrato de Al, indicando a formação da camada depositada. As espessuras estimadas variaram entre 217 nm e 258 nm, conforme apresentado na Tabela 5.

**Tabela 5** - Resultados obtidos por XRF para a deposição de SiC

| Identificação | Espessura SiC |
|---------------|---------------|
| Al + SiC – 1  | 217 nm        |
| Al + SiC – 2  | 250 nm        |
| Al + SiC – 3  | 258 nm        |

Fonte: Autor (2026).

A espessura média estimada para os filmes depositados foi de  $241,7 \pm 21,7$  nm ( $n = 3$ ). O coeficiente de variação de aproximadamente 9,0% indica uma dispersão moderada entre as medições, sugerindo estabilidade satisfatória do processo de deposição nas condições utilizadas.

Os valores obtidos são compatíveis com a faixa de espessura normalmente observada para filmes finos produzidos por técnicas de deposição física a vapor. Segundo Ohring (2002), a deposição por *magnetron sputtering* permite a obtenção de camadas com espessuras variando de dezenas a centenas de nanômetros, dependendo dos parâmetros de processo, como potência, tempo de deposição e fluxo de gás. Além disso, Wesch (1996) destaca que filmes de SiC obtidos por técnicas PVD podem apresentar espessuras reduzidas, mantendo as propriedades características do material e possibilitando a aplicação em revestimentos e dispositivos tecnológicos.

A obtenção de filmes com espessura média de  $242 \pm 22$  nm é relevante para este estudo, pois essa faixa dimensional é compatível com a caracterização morfológica e composicional de filmes finos, permitindo a avaliação da uniformidade da deposição e da presença dos elementos constituintes do material. De acordo com Masri (2002), o SiC apresenta elevada estabilidade química e térmica, sendo amplamente empregado em aplicações que demandam revestimentos finos e materiais de alto desempenho.

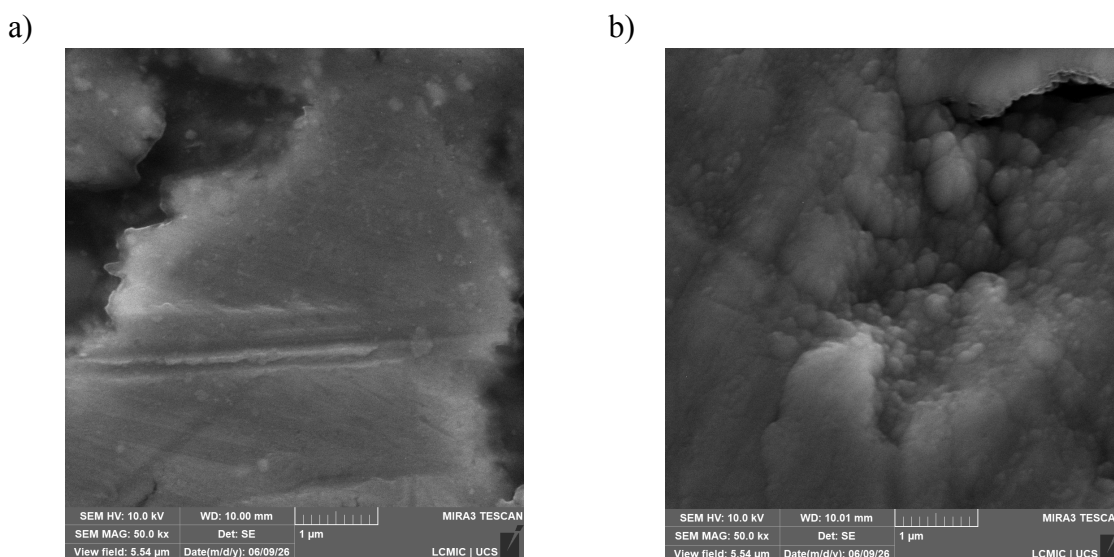
#### 5.4.2 MEV e EDS do SiC

Com o objetivo de avaliar a influência da deposição sobre a superfície do substrato, foram analisadas duas amostras: uma de Al sem revestimento e outra contendo o filme de SiC depositado por *magnetron sputtering* RF.

As micrografias mais representativas das análises realizadas são apresentadas nesta seção. Imagens complementares obtidas para o substrato de Al sem deposição e para a amostra com deposição de SiC, que não foram incluídas no corpo principal do texto para evitar repetição de informações, são apresentadas no Apêndice D. Essas imagens foram igualmente avaliadas e utilizadas na interpretação dos resultados discutidos a seguir.

A Figura 23-a apresenta a micrografia da superfície do substrato de Al sem deposição. Observa-se uma superfície relativamente homogênea, com marcas superficiais associadas ao acabamento e ao processamento prévio do material. Em contraste, a Figura 23-b apresenta a superfície da amostra recoberta com SiC. Nesse caso, verifica-se uma alteração significativa da morfologia superficial, caracterizada pela presença de estruturas nodulares e aglomerados distribuídos ao longo da superfície.

**Figura 23** – Micrografia da superfície do substrato de Al (50.000×): a) sem deposição; b) com deposição de SiC.



Fonte: Autor (2026).

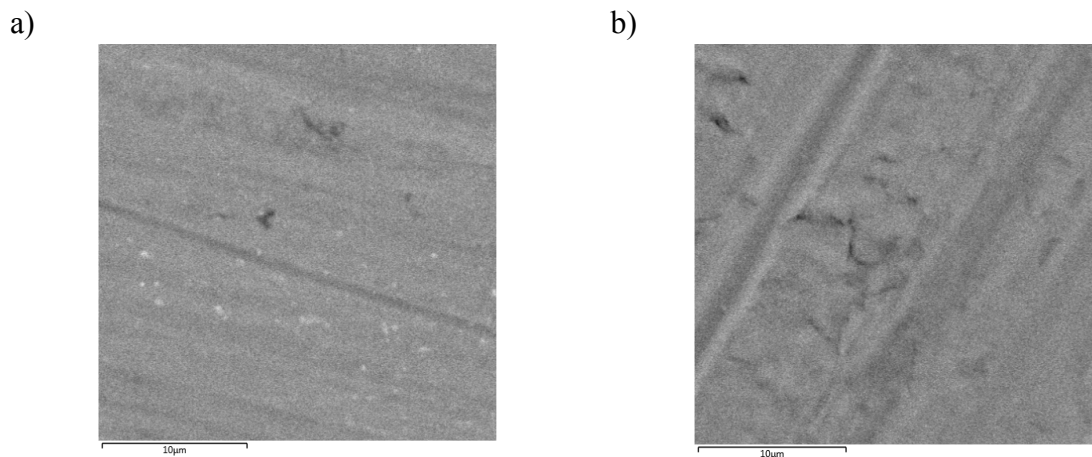
A diferença observada entre as duas micrografias indica que a deposição modificou a topografia do substrato, evidenciando a formação de uma camada superficial distinta daquela observada no Al sem revestimento. A superfície da amostra contendo SiC apresentou aspecto mais rugoso e heterogêneo, característica frequentemente associada a filmes cerâmicos obtidos por *magnetron sputtering* em temperatura ambiente.

Esse comportamento é compatível com a morfologia frequentemente observada em filmes finos obtidos por *magnetron sputtering*, nos quais o crescimento ocorre por processos sucessivos de nucleação, crescimento e coalescência das espécies depositadas sobre a

superfície do substrato (OHRING, 2002). A presença dessas estruturas superficiais sugere a ocorrência de aglomeração local de material durante a deposição, resultando em uma topografia mais irregular quando comparada ao substrato original. Além disso, a deposição em temperatura ambiente pode limitar a mobilidade superficial das espécies depositadas, favorecendo a formação de superfícies com maior heterogeneidade morfológica.

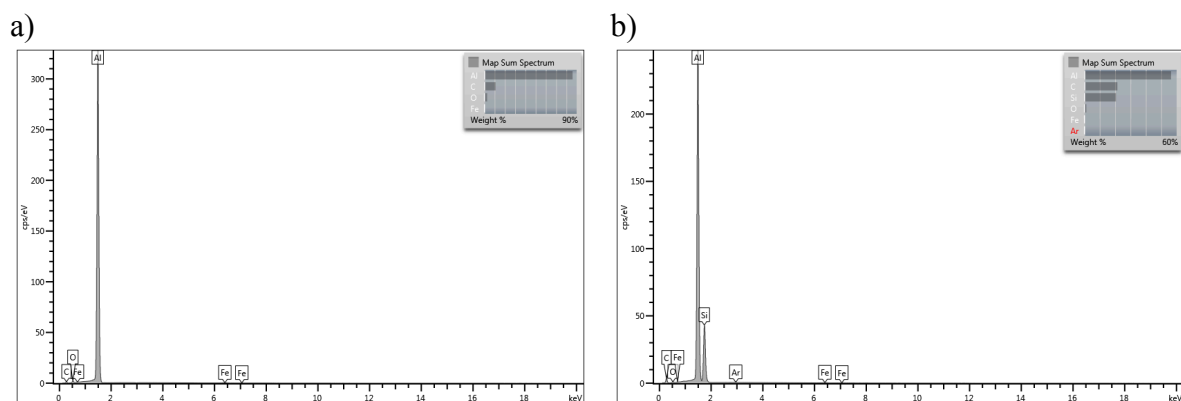
A composição química das superfícies foi avaliada por EDS, sendo realizadas análises tanto no substrato de Al sem deposição quanto na amostra contendo o filme de SiC depositado por *magnetron sputtering* RF. As Figuras 24-a e 24-b apresentam as regiões selecionadas para análise, enquanto as Figuras 25-a e 25-b mostram os respectivos espectros EDS obtidos para cada condição.

**Figura 24** – Região analisada por MEV: a) do Al sem deposição; b) da amostra Al + SiC.



Fonte: Autor (2026).

**Figura 25**– Espectro EDS: a) do Al sem deposição; b) da amostra Al + SiC.



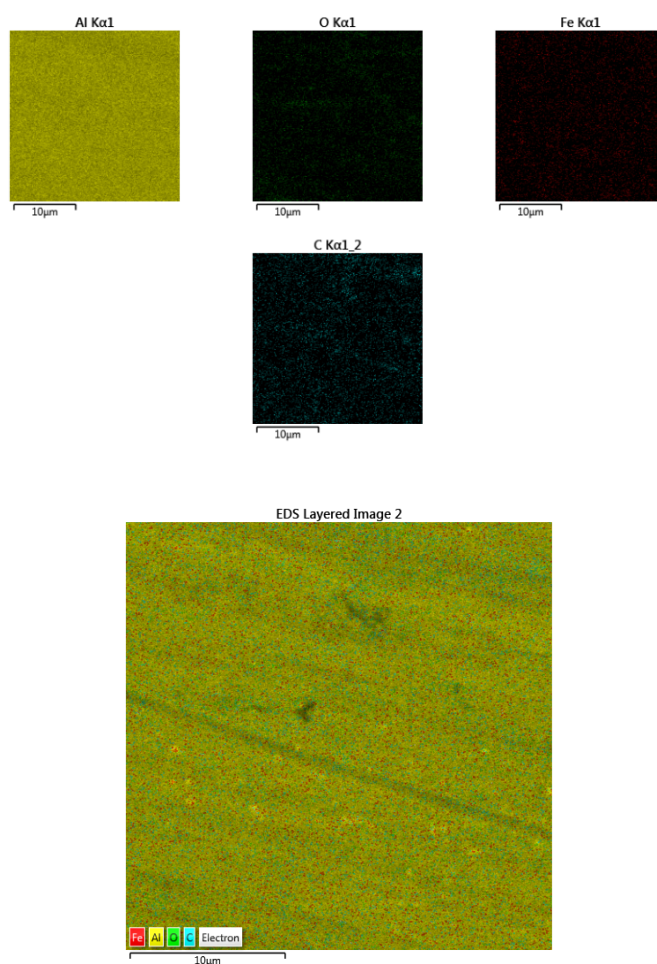
Fonte: Autor (2026).



Para a amostra contendo SiC, o espectro EDS apresentado na Figura 25-b revelou a presença simultânea de Si, C e Al. A detecção de Si representa uma diferença significativa em relação ao substrato sem deposição, constituindo um forte indicativo da deposição do filme de SiC sobre a superfície do Al. Além disso, foram observados sinais de oxigênio e traços de ferro, associados à superfície do substrato e às limitações inerentes ao volume de interação do feixe eletrônico.

O espectro referente ao substrato de Al sem deposição apresentou predominância do elemento Al, acompanhado por pequenas quantidades de oxigênio, C e ferro. A presença de oxigênio está associada à camada natural de óxido formada sobre a superfície do Al, enquanto os sinais de C podem estar relacionados à contaminação superficial proveniente da exposição da amostra ao ambiente ou ao processo de preparação para análise. Os mapas de distribuição química apresentados na Figura 26 evidenciam a distribuição homogênea desses elementos ao longo da região analisada, confirmando a composição característica do substrato.

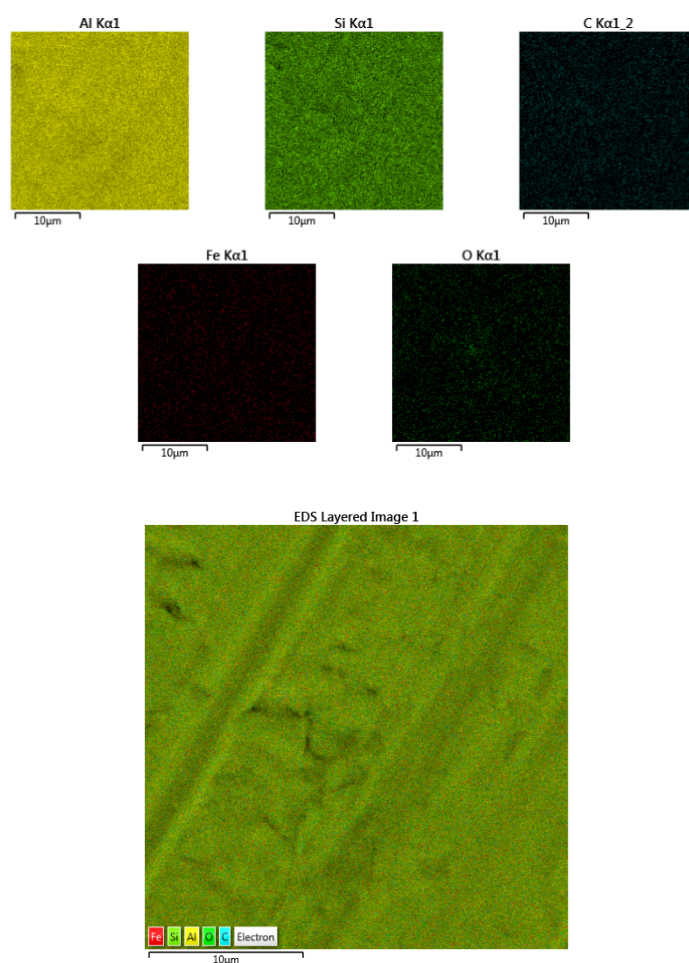
**Figura 26**– Mapas de distribuição química do Al sem deposição.



Fonte: Autor (2026).

Os mapas de distribuição química da amostra revestida, apresentados na Figura 27, demonstram a presença de Si distribuído ao longo de toda a região analisada, juntamente com os sinais de C e Al. A distribuição relativamente homogênea desses elementos sugere que a deposição ocorreu de forma uniforme sobre a superfície do substrato. A presença do Al nos espectros e mapas é coerente com a espessura reduzida do filme, estimada em aproximadamente 241,7 nm por XRF, permitindo que parte do volume excitado pelo feixe eletrônico alcance o substrato durante a análise.

**Figura 27**– Mapas de distribuição química da amostra Al + SiC.



Fonte: Autor (2026).

A comparação entre os resultados obtidos para o Al sem deposição e para a amostra contendo SiC evidencia a incorporação de Si à superfície após o processo de deposição. A presença simultânea de Si e C observada por EDS, associada aos resultados de fluorescência de raios X apresentados na seção anterior e às alterações morfológicas observadas por MEV, confirma a modificação da composição superficial do substrato em decorrência do processo de deposição.

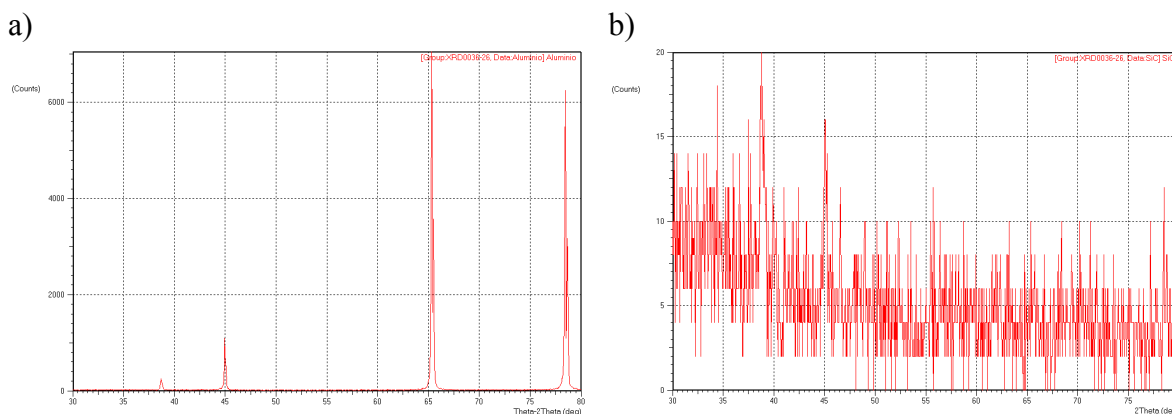
De modo geral, as análises de MEV e EDS demonstraram que a deposição foi efetiva, produzindo uma camada contendo os elementos característicos do SiC e promovendo alterações morfológicas e composicionais em relação ao substrato original. Esses resultados complementam as análises de espessura obtidas por XRF e fornecem evidências da formação do filme depositado, servindo como base para a avaliação estrutural por difração de raios X apresentada na seção seguinte.

### 5.4.3 Difração de Raios X do SiC

A Figura 28-a apresenta o difratograma obtido para o substrato de Al sem deposição. Observam-se picos intensos e bem definidos em aproximadamente 38°, 45°, 65° e 78° (2 $\theta$ ), atribuídos aos planos cristalográficos (111), (200), (220) e (311) do Al metálico com estrutura cúbica de face centrada, em concordância com a ficha cristalográfica ICDD PDF 04-0787. A elevada intensidade desses picos confirma a natureza cristalina do substrato utilizado neste trabalho.

A Figura 28-b apresenta o difratograma obtido para a amostra com SiC. Diferentemente do observado para o Al sem deposição, não foram identificados picos intensos e bem definidos atribuíveis ao SiC cristalino. O difratograma apresentou um sinal de baixa intensidade associado ao ruído de fundo, sem reflexões cristalográficas claramente distinguíveis do material depositado.

**Figura 28**– Difratograma: a) do substrato de Al sem deposição; b) da amostra Al + SiC.



Fonte: Autor (2026).

A ausência de picos característicos do SiC pode estar associada à reduzida espessura do filme, estimada em aproximadamente 241,7 nm por XRF, bem como às condições de

deposição empregadas. Como o processo foi realizado em temperatura ambiente, a mobilidade superficial das espécies depositadas é limitada, dificultando a reorganização atômica necessária para a formação de estruturas cristalinas de longo alcance. Segundo Ohring (2002), a temperatura do substrato exerce forte influência sobre a microestrutura dos filmes depositados por *magnetron sputtering*, podendo favorecer a obtenção de materiais com baixo grau de ordenamento estrutural quando são utilizadas temperaturas reduzidas.

Embora o SiC possa apresentar diferentes estruturas cristalinas, Wesch (1996) destaca que o material também pode ser obtido na forma amorfa, dependendo das condições de síntese e processamento. Nesse contexto, a ausência de reflexões cristalinas atribuíveis ao SiC no difratograma, associada à reduzida espessura do filme e à elevada intensidade dos sinais provenientes do substrato de Al, sugere que a camada depositada apresenta caráter amorfo. Essa interpretação é corroborada pelos resultados de XRF, MEV e EDS, que confirmaram a presença de Si e C na superfície da amostra, bem como alterações morfológicas e composicionais compatíveis com a formação do filme (OHRING, 2002; MASRI, 2002; WESCH, 1996).

## 6. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo analisar as características morfológicas, composicionais e estruturais de filmes finos de Cu e SiC depositados por técnicas de PVD, empregando *magnetron sputtering* DC para o Cu e RF para o SiC. A investigação buscou avaliar a influência do parâmetro de tempo de deposição sobre os filmes obtidos por meio de técnicas de caracterização como fluorescência de raios X, microscopia eletrônica de varredura, espectroscopia por dispersão de energia e difração de raios X.

Os resultados obtidos para os filmes de Cu demonstraram que o aumento do tempo de deposição promoveu crescimento progressivo da espessura das camadas depositadas. As análises por XRF indicaram espessuras médias de aproximadamente 193 nm, 283 nm e 336 nm para os tempos de deposição de 3, 5 e 7 minutos, respectivamente. As micrografias obtidas por MEV evidenciaram a formação de filmes contínuos sobre o substrato, apresentando morfologia compatível com os mecanismos de nucleação, crescimento e coalescência descritos na literatura para filmes metálicos depositados por *magnetron sputtering*. As análises por EDS confirmaram a predominância do Cu nas regiões analisadas, bem como a presença da camada intermediária de Ti utilizada para promover a adesão ao substrato vítreo. Complementarmente, os difratogramas obtidos para as amostras depositadas durante 3 e 7 minutos apresentaram picos característicos da estrutura FCC do Cu metálico, confirmando a formação de filmes cristalinos nas condições empregadas.

Para os filmes de SiC depositados sobre Al, as análises por XRF indicaram espessura média próxima de 242 nm. As observações realizadas por MEV demonstraram alterações significativas na morfologia superficial quando comparadas ao substrato de Al sem deposição, evidenciando a formação de uma camada superficial distinta. As análises por EDS confirmaram a presença simultânea de Si e C na superfície da amostra revestida, além do Al proveniente do substrato, enquanto os mapas de distribuição química indicaram distribuição relativamente homogênea dos elementos identificados. Embora as análises de XRF, MEV e EDS tenham confirmado a deposição do filme de SiC, os resultados de DRX não evidenciaram picos cristalinos atribuíveis ao SiC. Esse comportamento sugere que o filme de SiC depositado apresenta baixa cristalinidade ou caráter amorfo nas condições de deposição utilizadas.

Os resultados obtidos permitiram atender aos objetivos propostos e contribuíram para a compreensão dos processos de deposição empregados, bem como para a caracterização física dos filmes produzidos. As técnicas de XRF, MEV, EDS e DRX forneceram

informações complementares que possibilitaram avaliar a espessura, a morfologia, a composição química e as características estruturais dos filmes depositados.

Como perspectivas para trabalhos futuros, recomenda-se a investigação da adesão entre camadas de Cu e SiC, uma vez que dificuldades de adesão foram observadas durante o desenvolvimento experimental. Também é recomendada a realização dos ensaios elétricos originalmente propostos, incluindo medições de resistividade, curvas corrente–tensão (I–V) e ensaios de rigidez dielétrica, permitindo correlacionar as características físicas dos filmes com o desempenho elétrico. Por fim, sugere-se a substituição do SiC por filmes de SiN, conforme previsto na concepção inicial do trabalho, possibilitando a comparação entre diferentes materiais dielétricos obtidos por técnicas de deposição física a vapor.

## REFERÊNCIAS

- ASHCROFT, Neil W.; MERMIN, N. David.** *Solid State Physics*. 1. ed. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1976.
- BELIAEV, L. Y.** *Optical, structural and composition properties of silicon nitride deposited by sputtering, low pressure and plasma-enhanced chemical vapor deposition*. 2023.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G.** *Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- CHEN, P.-H.; CHEN, W.-J.; TSENG, J.-Y.** *Thermal stability of the copper and the AZO layer on textured silicon*. *Surface and Coatings Technology*, v. 418, p. 127226, 2021. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127226.
- CIÊNCIA VIVA.** *Conhecendo um MEV microscópio eletrônico de varredura*. [s.l.], [s.d.]. Disponível em: <https://cienciaviva.org.br/conhecendo-um-mev-microscopio-eletronico-de-varredura/>. Acesso em: 30 out. 2025.
- COLIN, J.; JAMNIG, A.; FURGEAUD, C.; et al.** *In situ and real-time nanoscale monitoring of ultra-thin metal film growth using optical and electrical diagnostic tools*. 2020.
- CORREIA, Evandro; DANTAS, Jeânderson; ANDRADE, José.** *Considerações acerca dos conceitos de condutores, isolantes e semicondutores nos livros de Ensino Médio sob um olhar da teoria de bandas de energia*. *Scientia Plena*. 13. 10.14808/sci.plena.2017.012716.
- DENTON VACUUM.** *Discovery – Thin Film Deposition System*. Moorestown: Denton Vacuum, [s.d.]. Disponível em: <https://www.dentonvacuum.com/products/discovery/>. Acesso em: 20 out. 2025.
- HEGEDÜS, N.; BUDINSZKY, G.; KÓSA, A.** *Silicon Nitride and Hydrogenated Silicon Nitride Thin Films: A Review*. *Micromachines*, v. 12, n. 10, p. 1267, 2021.
- HAMMADI, Dina F.; AHMED ADNAN, Raad S.; AL-SARRAF, Mohammed A.** *The effect of silicon carbide addition on the transformation temperatures and wear resistance of Cu-based shape memory alloys*. *Materials Today: Proceedings*, v. 62, p. 6068–6076, 2022. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.1010.
- iST INTEGRATED SERVICE TECHNOLOGY.** *Intelligent Interpretation of True or False Signals in EM/EDS Analysis*. Taiwan: iST, 25 jun. 2024. Disponível em: [https://www.istgroup.com/en/tech\\_20240625-tem-eds/](https://www.istgroup.com/en/tech_20240625-tem-eds/). Acesso em: 30 out. 2025.
- KILIAN, A.; WEINZIERL, J.; SCHMIDT, L.-P.** *Investigation of the Hot Embossing Technology for Low-Cost Antennas Printed on Polymer Substrates*. In: *Proceedings of the*

38th European Microwave Conference. Amsterdam: IEEE, 2008. p. 1–4. DOI: 10.1109/EUMC.2008.4751371.

**LOOS, Marcio Rodrigo.** *Nanociência e nanotecnologia: compósitos termofixos reforçados com nanotubos de C.* 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2014. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 10 out 2025.

**LIU, Shuangjie; LI, Xingwang; HAO, Yongping; LI, Xing; LIU, Fengli.** *Effect of magnetron sputtering process parameters on the conductivity of thin metal film.* AIP Advances, v. 13, n. 9, artigo 095326, 2023. DOI: 10.1063/5.0170746.

**MASRI, Pierre.** *Silicon carbide and silicon carbide-based structures: the physics of epitaxy.* Surface Science Reports, Amsterdam, v. 48, n. 1–4, p. 1–51, 2002.

**MEASURLABS.** *Grazing incidence X-ray diffraction (GIXRD): método e aplicação.* [S.l.]: MeasurLabs, [s.d.]. Disponível em: <https://measurlabs.com/methods/grazing-incidence-x-ray-diffraction-gixrd/>. Acesso em: 23 out. 2025.

**MININI, Andrea.** *Il resistore: cos'è e come funziona.* [s.d.]. Disponível em: <https://www.andreaminini.org/elettronica/resistore>. Acesso em: 30 out. 2025.

**OHRING,** *Materials Science of Thin Films.* 2nd ed. Academic Press, 2002.

**ONU (2015).** *Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável.*

**OPENSTAX.** *Física Universitária (OpenStax) — Resistência e resistividade.* LibreTexts, [s.l.], 2022. Disponível em: [https://query.libretexts.org/Idioma\\_Portugues/Fisica\\_Universitaria\\_%28OpenStax%29/20%3A\\_A\\_Corrente\\_eletrica\\_resistencia\\_e\\_lei\\_de\\_Ohm/20.03%3A\\_Resist%C3%Aancia\\_e\\_resistividade](https://query.libretexts.org/Idioma_Portugues/Fisica_Universitaria_%28OpenStax%29/20%3A_A_Corrente_eletrica_resistencia_e_lei_de_Ohm/20.03%3A_Resist%C3%Aancia_e_resistividade). Acesso em: 30 out. 2025.

**PADOVANI, A.; et al.** *Dielectric breakdown of oxide films in electronic devices.* [s.l.]: [s.n.], 2024. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41578-024-00702-0>. Acesso em: 30 out. 2025.

**PANA, I.; PARAU, A. C.; DINU, M.; et al.** *Development and evaluation of copper based transparent heat reflectors obtained by magnetron sputtering.* 2022.

**SHACKELFORD, J. F.** *Ciência dos materiais.* 6. ed. São Paulo: Pearson, 2008. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 20 set 2025.

**TATSUMI, H.; MOON, S.; TAKAHASHI, M.; KOZAWA, T.; TSUSHIMA, E.; NISHIKAWA, H.** *Quasi-direct Cu–Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> bonding using multi-layered active metal deposition for power-module substrate.* Materials & Design, v. 238, p. 112637, 2024.



**TEIXEIRA, F. de S.** *Anisotropia de resistividade elétrica em filmes finos nanoestruturados*. 2007. Tese (Doutorado).

**TOMA, H. E.** *O mundo nanométrico: a dimensão do novo século*. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 07 set 2025.

**TOMA, Henrique Eisi.** *Nanotecnologia molecular: materiais e dispositivos*. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2019. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 10 set 2025.

**WESCH, Wolfgang.** *Silicon carbide: synthesis and processing*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, v. 116, n. 1-4, p. 305-321, 1996. DOI: 10.1016/0168-583X(96)00065-1.

**XIONG, L.; HU, J.; YANG, Z.; et al.** *Dielectric Properties Investigation of Metal–Insulator–Metal (MIM) Capacitors*. 2022.

**YAŞAR, Zeynep Aygüzer; DELUCCA, Vincent A.; HABER, Richard A.** *Effect of carbon source on the properties of dense  $\alpha$ -SiC*. Materials Research Express, v. 8, artigo 125601, 2021. DOI: 10.1088/2053-1591/ac406c.

**YOU, D.; et al.** *Effect of ion assistance on silicon nitride films deposited by reactive PVD*. Surface & Coatings Technology, 2023.

**ZHANG, John XJ; HOSHINO, Kazunori.** *Fundamentals of nano/microfabrication and scale effect*. Molecular Sensors and Nanodevices, p. 43-111, 2019.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE XRF DAS AMOSTRAS DE COBRE

**Tabela A1** – Resultados individuais de espessura obtidos por XRF para as amostras de Cu

| Identificação nominal | Espessura Cu (nm) |
|-----------------------|-------------------|
| 3 min                 | 177,212           |
| 3 min – 2             | 209,501           |
| 5 min                 | 275,138           |
| 5 min – 2             | 291,714           |
| 7 min                 | 295,963           |
| 7 min – 2             | 376,624           |

Fonte: Autor (2026).

**Figura A1**– Resultados de XRF: a) 3 min; b) 3 min-2; c) 5 min; d) 5 min-2; e) 7 min; f) 7 min-2

a)

| Quantitative Result                  |                |                  |                  |               |
|--------------------------------------|----------------|------------------|------------------|---------------|
| Analyte                              | Result         | [3-sigma]        | Proc.-Calc. Line | Int. (cps/uA) |
| ====[No. 1 Layer]====< Layer1 >===== |                |                  |                  |               |
| Layer1                               | 177.212 nm     | [-----] Total    | -----            | -----         |
| Cu                                   | 158.250 ug/cm2 | [ 0.641] Quan-FP | CuKa             | 5.3869        |

b)

| Quantitative Result                  |                |                  |                  |               |
|--------------------------------------|----------------|------------------|------------------|---------------|
| Analyte                              | Result         | [3-sigma]        | Proc.-Calc. Line | Int. (cps/uA) |
| ====[No. 1 Layer]====< Layer1 >===== |                |                  |                  |               |
| Layer1                               | 209.501 nm     | [-----] Total    | -----            | -----         |
| Cu                                   | 187.084 ug/cm2 | [ 0.380] Quan-FP | CuKa             | 471.1867      |

c)

| Quantitative Result                  |                |                  |                  |               |
|--------------------------------------|----------------|------------------|------------------|---------------|
| Analyte                              | Result         | [3-sigma]        | Proc.-Calc. Line | Int. (cps/uA) |
| ====[No. 1 Layer]====< Layer1 >===== |                |                  |                  |               |
| Layer1                               | 275.138 nm     | [-----] Total    | -----            | -----         |
| Cu                                   | 245.698 ug/cm2 | [ 0.806] Quan-FP | CuKa             | 8.2758        |

d)

| Quantitative Result                  |                |                  |                  |               |
|--------------------------------------|----------------|------------------|------------------|---------------|
| Analyte                              | Result         | [3-sigma]        | Proc.-Calc. Line | Int. (cps/uA) |
| ====[No. 1 Layer]====< Layer1 >===== |                |                  |                  |               |
| Layer1                               | 291.714 nm     | [-----] Total    | -----            | -----         |
| Cu                                   | 260.501 ug/cm2 | [ 0.472] Quan-FP | CuKa             | 650.3078      |

e)

| Quantitative Result                  |                |                  |                  |               |
|--------------------------------------|----------------|------------------|------------------|---------------|
| Analyte                              | Result         | [3-sigma]        | Proc.-Calc. Line | Int. (cps/uA) |
| ====[No. 1 Layer]====< Layer1 >===== |                |                  |                  |               |
| Layer1                               | 376.624 nm     | [-----] Total    | -----            | -----         |
| Cu                                   | 336.325 ug/cm2 | [ 0.573] Quan-FP | CuKa             | 286.8103      |

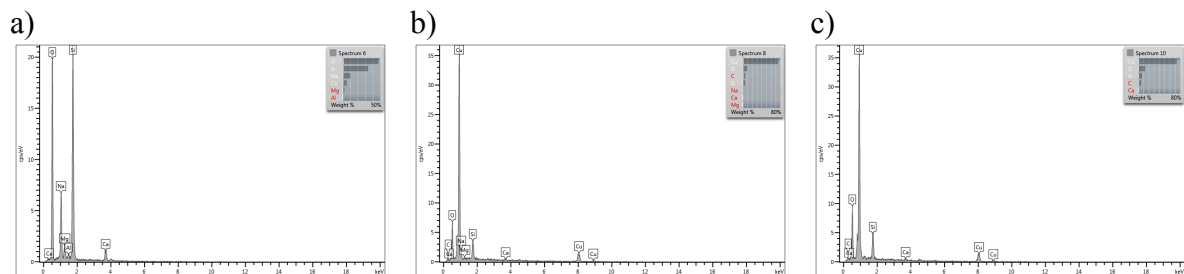
f)

| Quantitative Result                  |                |                  |                  |               |
|--------------------------------------|----------------|------------------|------------------|---------------|
| Analyte                              | Result         | [3-sigma]        | Proc.-Calc. Line | Int. (cps/uA) |
| ====[No. 1 Layer]====< Layer1 >===== |                |                  |                  |               |
| Layer1                               | 295.963 nm     | [-----] Total    | -----            | -----         |
| Cu                                   | 264.295 ug/cm2 | [ 0.837] Quan-FP | CuKa             | 8.8823        |

Fonte: Autor (2026).

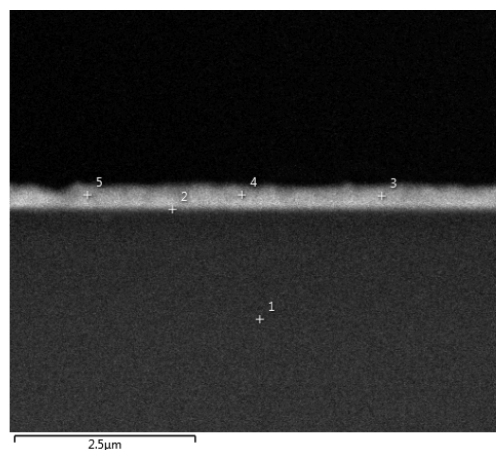
## APÊNDICE B – ESPECTROS EDS COMPLEMENTARES DA AMOSTRA DE COBRE

**Figura B1**– Espectro EDS da amostra de 5 minutos; a) ponto 6; b) ponto 8; c) ponto 10.



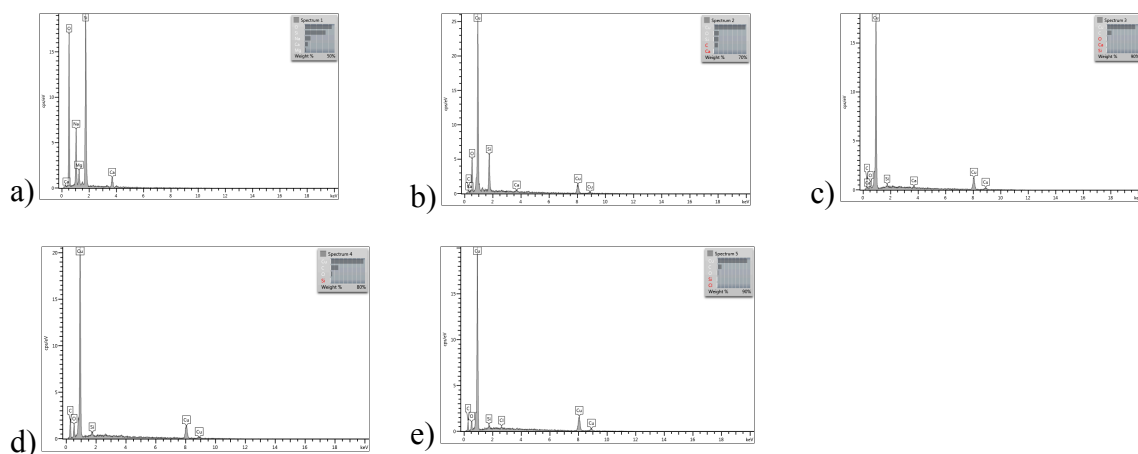
Fonte: Autor (2026).

**Figura B2**– Micrografia de seção transversal da amostra de Cu depositada durante 3 minutos, indicando os pontos utilizados para análise por EDS.



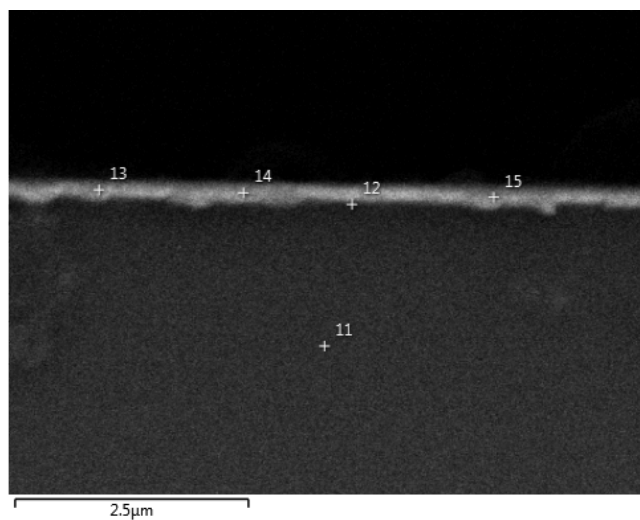
Fonte: Autor (2026).

**Figura B3**– Espectros de EDS da amostra de 3 minutos, a) ponto 1; b) ponto 2; c) ponto 3, d) ponto 4, e) ponto 5



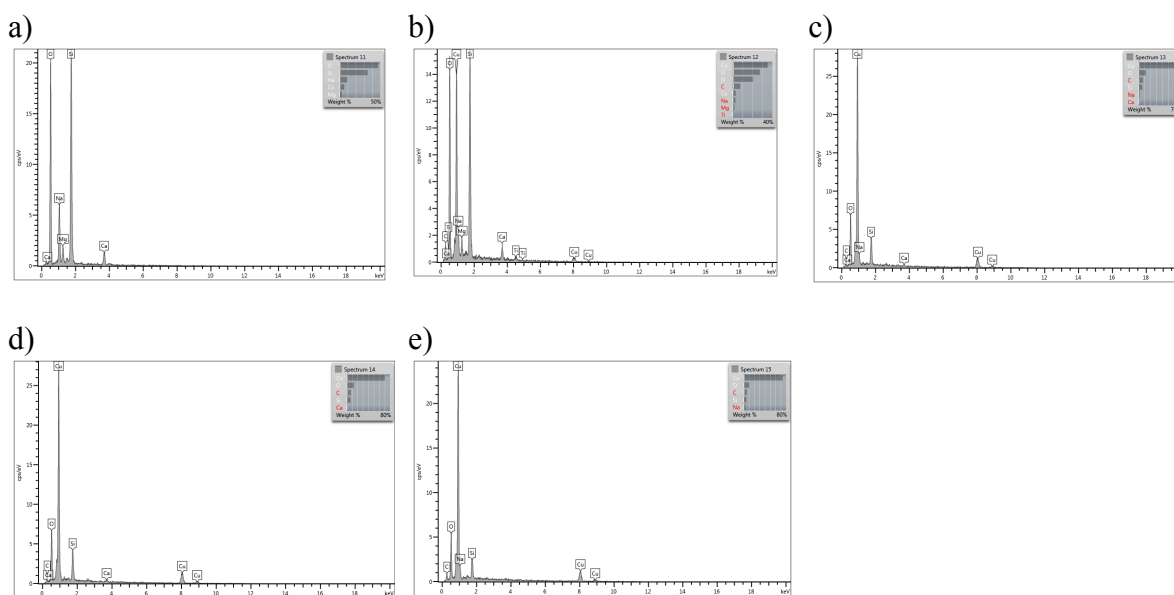
Fonte: Autor (2026).

**Figura B4**– Micrografia de seção transversal da amostra de Cu depositada durante 7 minutos, indicando os pontos utilizados para análise por EDS.



Fonte: Autor (2026).

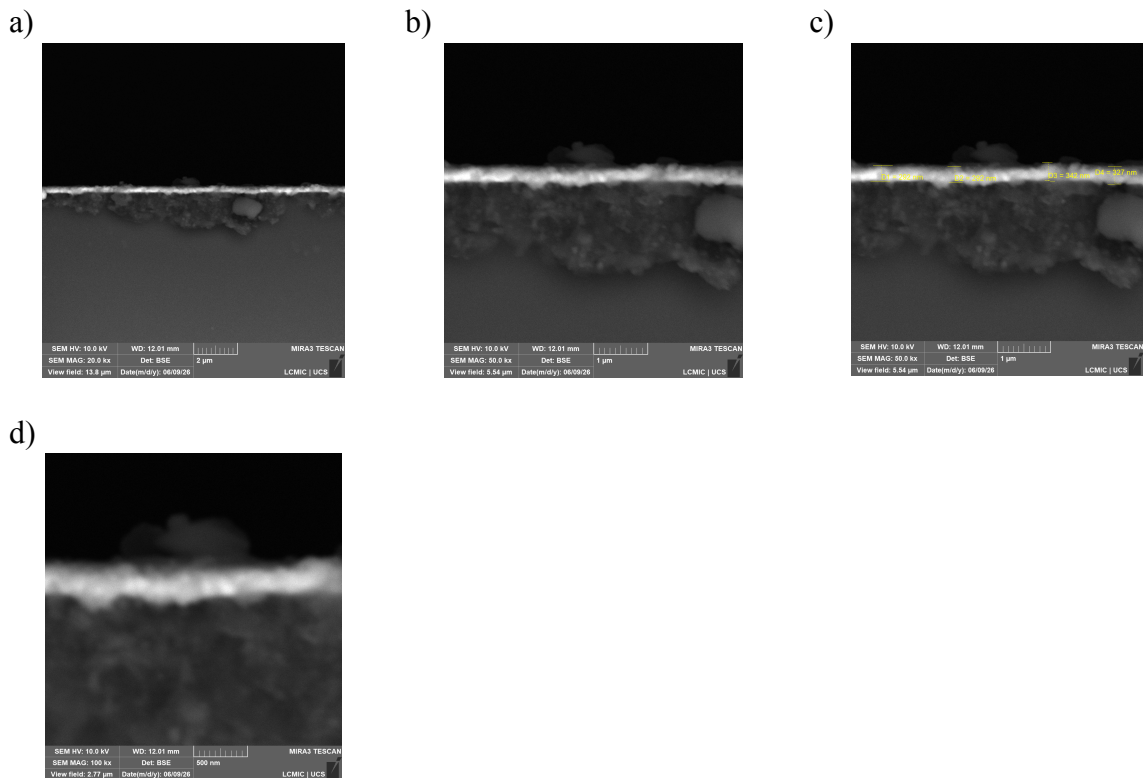
**Figura B5**– Espectros de EDS da amostra de 7 minutos, a) ponto 11; b) ponto 12; c) ponto 13, d) ponto 14, e) ponto 15



Fonte: Autor (2026).

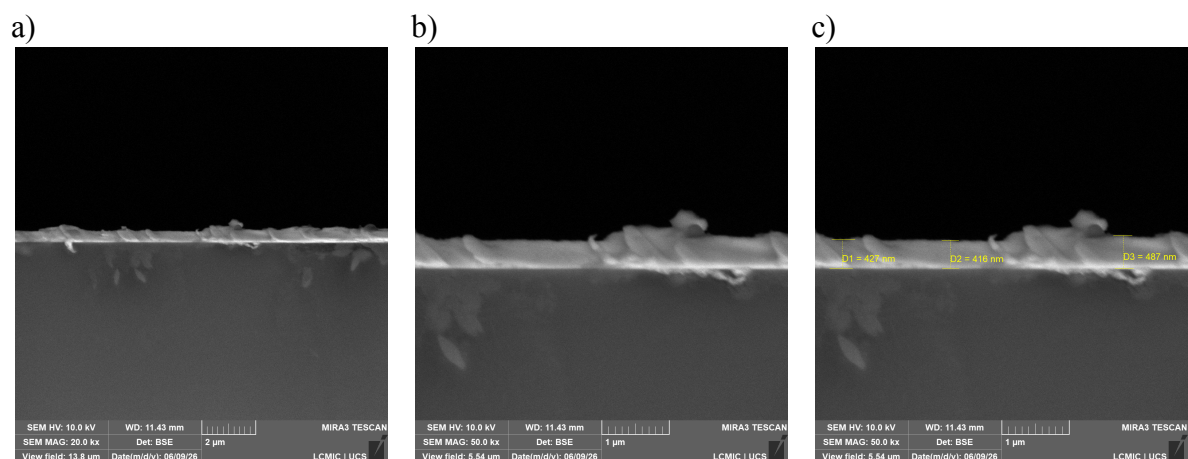
## APÊNDICE C – IMAGENS MEV COMPLEMENTARES DA AMOSTRA DE COBRE

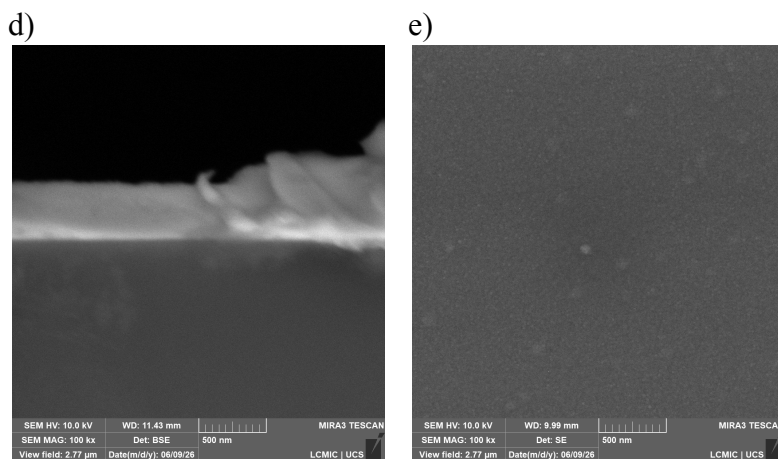
**Figura C1**– Imagens de MEV da amostra de 3 minutos, a) 20.000X; b) 50.000 X; c) 50.000 X com medidas; d) 100.000 X.



Fonte: Autor (2026).

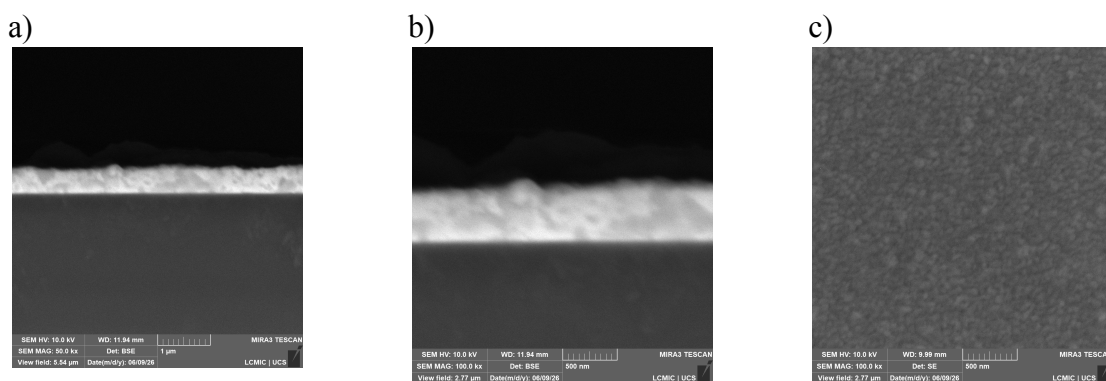
**Figura C2**– Imagens de MEV da amostra de 5 minutos, a) 20.000X; b) 50.000 X; c) 50.000 X com medidas; d) 100.000 X; e) superfície 100.000 X.





Fonte: Autor (2026).

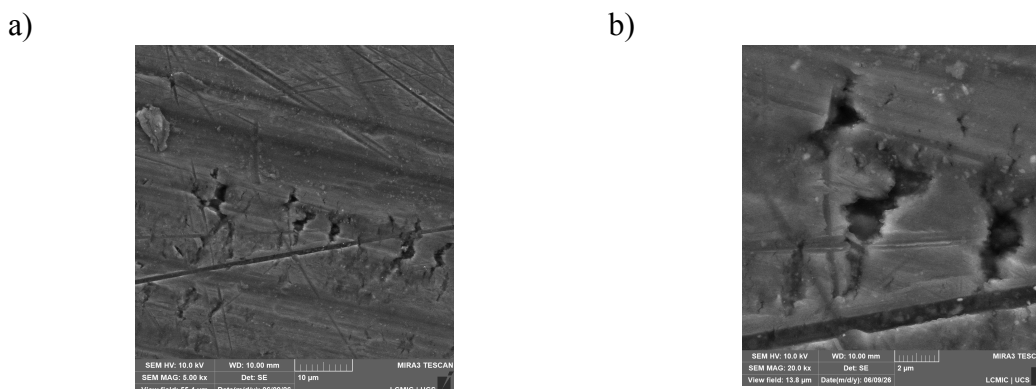
**Figura C3**– Imagens de MEV da amostra de 7 minutos, a) 50.000 X; b) 100.000 X; c) superfície 100.000 X.



Fonte: Autor (2026).

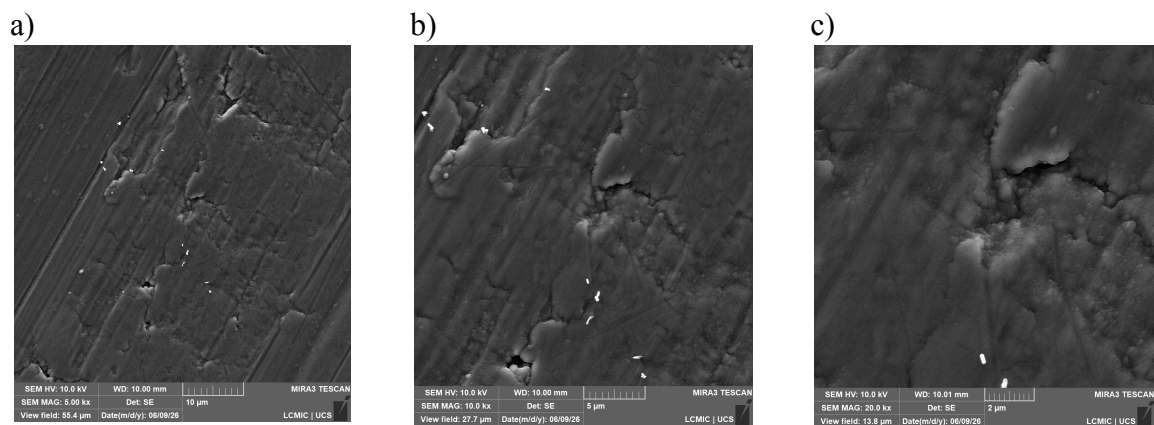
## APÊNDICE D – IMAGENS MEV COMPLEMENTARES DA AMOSTRA DE CARBETO DE SILÍCIO

**Figura D1**– Imagens de MEV da amostra de Al sem deposição, a) 5.000X; b) 20.000 X.



Fonte: Autor (2026).

**Figura D2**– Imagens de MEV da amostra de Al com deposição do SiC, a) 5.000X; b) 10.000 X; c) 20.000 X;



Fonte: Autor (2026).