



República Federativa do Brasil
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



Curso de ENGENHARIA FÍSICA

Trabalho de Conclusão de Curso

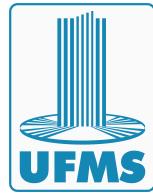
Tintas Condutoras à base de Estruturas Bidimensionais de Carbono

HELEN BACARGI DE FIGUEIREDO SANTOS

Orientador: Prof. Dr. Diego Carvalho Barbosa Alves

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
curso de Engenharia Física do Instituto de Física
(INFI), da Universidade Federal de Mato Grosso
do Sul (UFMS).

Campo Grande - MS
Novembro de 2025



“Alma de Cristo, santificai-me.

Corpo de Cristo, salvai-me.

Sangue de Cristo, inebriai-me.

Água do lado de Cristo, lavai-me.

Paixão de Cristo, confortai-me.

Ó bom Jesus, ouvi-me.

Dentro de Vossas chagas, escondei-me.

Não permitais que eu me separe de Vós.

Do inimigo maligno, defendei-me.

Na hora da minha morte, chamai-me,

e mandai-me ir para Vós,

Para que Vos louve com os Vossos Santos,

pelos séculos dos séculos.

Amém.”

– Oração alma de Cristo



AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, rendo minha gratidão a Deus, por ser a luz que guiou meus passos e a força que me impediu de desistir. Nos momentos mais desafiadores, o consolo veio através de minha fé católica e da inestimável intercessão de Nossa Senhora, que gentilmente me sustentou.

Aos meus amados pais, Gislene Bacargi e Sérvulo Benedito de Figueiredo Santos, por serem o alicerce mais seguro da minha vida. Por cada palavra de incentivo e por terem fé na minha capacidade, mesmo quando a minha própria vacilava. Esta conquista é um reflexo do amor e do investimento de vocês.

Aos meus avós Iracema e Miguel Bacargi, demais familiares e amigos, e ao meu companheiro Thalisson Cardena e sua família. Agradeço a todos estes pelo apoio, pelas conversas e pelos momentos de distração que foram essenciais para recarregar as energias a cada período tornando a caminhada mais leve.

Ao meu estimado orientador, Professor Dr. Diego Carvalho Barbosa Alves, por me auxiliar na produção deste trabalho, dedicando seu tempo e vasto conhecimento. Agradeço pelo apoio e compreensão em todos os momentos, pois fizeram toda a diferença nessa etapa final.

Aos membros da banca examinadora, Professor Dr. Além-Mar Bernardes Gonçalves e Professor Dr. Cícero Rafael Cena da Silva, pela generosidade em analisar criticamente este trabalho, contribuindo para o seu aperfeiçoamento e validação.

Sou grata a todos os professores do INFI que contribuíram com a minha formação a cada semestre, em especial gostaria de agradecer à Professora Dra. Dorotéia de Fátima Bozano e ao Professor Dr. Diogo Duarte dos Reis por serem sempre muito atenciosos comigo. Agradeço também pelo suporte de todos os técnicos, em especial ao Dr. Flávio Santana Michels.

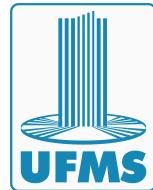
Por fim, a todos que me estenderam a mão durante minha graduação, expresso meu mais sincero obrigada.



RESUMO

O presente trabalho enfoca o desenvolvimento e a caracterização elétrica de tintas condutoras à base de estruturas bidimensionais de carbono, visando aplicações em dispositivos funcionais de eletrônica impressa. Diante da limitação de custo e estabilidade das tintas comerciais baseadas em metais nobres e da susceptibilidade à oxidação de metais como o cobre, esta pesquisa explora materiais carbonáceos como alternativas viáveis e de baixo custo. O objetivo geral foi desenvolver e caracterizar formulações otimizadas para aplicação em substratos flexíveis e rígidos, com foco na aderência, condutividade e estabilidade térmica. Foram elaboradas três formulações distintas, utilizando sistemas solvente/ligante compatíveis (acetona/base de unha e água deionizada/Poli(álcool vinílico) - PVA), e depositadas por meio da técnica de revestimento por lâmina (*blade coating*). A caracterização elétrica dos filmes foi realizada utilizando o método de medição de quatro pontas colineares, que elimina a interferência da resistência de contato e permite a obtenção de valores precisos de resistência de folha (Rs). As amostras foram submetidas a tratamentos térmicos controlados para avaliar o impacto na condutividade e estabilidade. Adicionalmente, a análise da linearidade das curvas tensão-corrente (curvas IV) foi empregada para confirmar o comportamento ôhmico dos filmes produzidos. Os resultados obtidos forneceram subsídios cruciais para aprimorar as rotinas de formulação e tratamento térmico, contribuindo para o desenvolvimento de soluções acessíveis, estáveis e reproduutíveis, essenciais para a consolidação de tecnologias de impressão de circuitos de baixo custo.

Palavras-chave: Tinta Condutora, Carbon Black, Óxido de Grafeno, Eletrônica Impressa, Resistência de Folha, Método de Quatro Pontas.



ABSTRACT

The present study focuses on the development and electrical characterization of conductive inks based on two-dimensional carbon structures, targeting applications in functional printed electronics devices. Given the cost and stability limitations of commercial noble-metal-based inks and the susceptibility to oxidation of metals like copper, this research explores carbonaceous materials as viable and low-cost alternatives. The general objective was to develop and characterize formulations optimized for application on both flexible and rigid substrates, focusing on adhesion, conductivity, and thermal stability. Three distinct formulations were prepared, utilizing compatible solvent/binder systems (acetone/nail base and deionized water/Poly(vinyl alcohol) - PVA), and deposited via the blade coating technique. The electrical characterization of the films was performed using the four-point collinear probe method, which eliminates the interference of contact resistance and allows for the accurate determination of sheet resistance (R_s). The samples were subjected to controlled thermal treatments to evaluate the impact on conductivity and stability. Furthermore, the analysis of the linearity of the current-voltage (IV) curves was employed to confirm the ohmic behavior of the produced films. The obtained results provided crucial groundwork for improving formulation and thermal treatment routines, contributing to the development of accessible, stable, and reproducible solutions, which are essential for the consolidation of low-cost circuit printing technologies.

Keywords: Conductive Ink, Carbon Black, Graphene Oxide, Printed Electronics, Sheet Resistance, Four-Point Probe Method.



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Análise de superfície por MEV de amostras de tinta à base de estruturas de carbono após tratamento térmico temperatura.....	14
Figura 2. Diagrama das partículas condutoras na tinta condutora antes e depois da sinterização: (a) antes da sinterização; (b) depois da sinterização.....	16
Figura 3. Modelos de mecanismo de condução em tintas condutoras.....	18
Figura 4. Ilustração do método de deposição por lâmina.....	20
Figura 5. Geometria empregada na medida de quatro pontas.....	22
Figura 6. Amostras de tinta PVACB depositadas em substratos de vidro (a) e de plástico (b).....	30
Figura 7. Secagem das amostras utilizando luz infravermelho.....	30
Figura 8. Sistema experimental utilizado para caracterização elétrica.....	31
Figura 9. Visão frontal (a) e visão lateral (b) do dispositivo de medida utilizado no método de quatro pontas colineares.....	32
Figura 10. Gráfico comparativo da Média das Resistências Média (Ω) e Resistências de Folha Média (Ω/sq), com seus respectivos desvios padrão, para cada formulação de tinta e sua condição.....	35
Figura 11. Gráfico da Média das Condutividades Média (S/m) com seu respectivo desvio padrão.....	37
Figura 12. Gráfico contendo as curvas IV para as cinco amostras de tinta ACCB no substrato vítreo em condições iniciais e pós-cura (ACCB-T).....	39
Figura 13. Gráfico contendo as curvas IV para as cinco amostras de tinta PVACB no substrato plástico em condições iniciais (PVACB-P) e pós-cura (PVACB-PT).....	40
Figura 14. Gráfico contendo as curvas IV para as cinco amostras de tinta PVACB no substrato vítreo em condições iniciais (PVACB-V) e pós-cura (PVACB-VT).....	41
Figura 15. Gráfico contendo as curvas IV para as cinco amostras de tinta PVACBGO no substrato plástico em condições iniciais (PVACBGO-P) e pós-cura (PVACBGO-PT).....	42

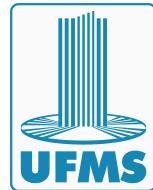


Figura 16. Gráfico contendo as curvas IV para as cinco amostras de tinta PVACBGO no substrato vítreo em condições iniciais (PVACBGO-V) e pós-cura (PVACBGO-VT).....	43
Figura 17. Visão macroscópica dos filmes das formulações ACCB em substrato vítreo (a), PVACB depositado em vidro (b) e em plástico (c); e PVACBGO em substrato vítreo (d) e plástico (e).....	45
Figura 18. Imagens feitas por MEV para filme da tinta ACCB depositado sobre o substrato de vidro após o tratamento térmico.....	46
Figura 19. Imagens feitas por MEV para filme da tinta PVACB depositado sobre o substrato de vidro após o tratamento térmico.....	47
Figura 20. Imagens feitas por MEV para filme da tinta PVACB depositado sobre o substrato de plástico após o tratamento térmico.....	48
Figura 21. Imagens feitas por MEV para filme da tinta PVACBGO depositado sobre o substrato de vidro após o tratamento térmico.....	49
Figura 22. Imagens feitas por MEV para filme da tinta PVACBGO depositado sobre o substrato de plástico após o tratamento térmico.....	50
Figura 23. Imagens feitas por MEV para filmes das tintas (a) ACCB em vidro, (b) PVACB em vidro, (c) PVACB em plástico, (d) PVACBGO em vidro, e (e) PVACBGO em plástico, todos após tratamento térmico.....	51



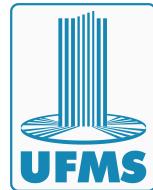
LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Comparativo entre Tintas Condutivas com Diferentes Cargas Funcionais e Suas Propriedades Morfológicas.....	15
Tabela 2. Comparativo técnico entre métodos de deposição de tintas condutivas.....	21
Tabela 3. Comparativo entre os métodos de caracterização elétrica.....	23
Tabela 4. Materiais utilizados nas formulações ACCB, PVACB e PVACBGO.....	26
Tabela 5. Materiais utilizados na deposição das formulações ACCB, PVACB e PVACBGO.....	29
Tabela 6. Parâmetros do ensaio elétrico por quatro pontas.....	33
Tabela 7. Valores de Resistência Média em Ω para as amostras correspondentes as tintas ACCB, PVACB e PVACBGO de vidro antes (-V) e após tratamento térmico (-VT).....	57
Tabela 8. Valores de Resistência Média em Ω para as amostras correspondentes as tintas PVACB E PVACBGO de plástico antes (-P) e após tratamento térmico (-PT).....	57
Tabela 9. Valores de Resistência de Folha Média em Ω/sq para as amostras correspondentes as tintas ACCB, PVACB e PVACBGO de vidro antes (-V) e após tratamento térmico (-VT).....	58
Tabela 10. Valores de Resistência de Folha Média em Ω/sq para as amostras correspondentes as tintas PVACB E PVACBGO de plástico antes (-P) e após tratamento térmico (-PT).....	58
Tabela 11. Valores de Resistividade Média em $\Omega \cdot \text{m}$ para as amostras correspondentes as tintas ACCB, PVACB e PVACBGO de vidro antes (-V) e após tratamento térmico (-VT).....	59
Tabela 12. Valores de Resistividade Média em $\Omega \cdot \text{m}$ para as amostras correspondentes as tintas PVACB E PVACBGO de plástico antes (-P) e após tratamento térmico (-PT).....	59
Tabela 13. Valores de Condutividade Média em S/m para as amostras correspondentes as tintas ACCB, PVACB e PVACBGO de vidro antes (-V) e após tratamento térmico (-VT).....	60
Tabela 14. Valores de Condutividade Média em S/m para as amostras correspondentes as tintas PVACB E PVACBGO de plástico antes (-P) e após tratamento térmico (-PT).....	60



SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1. Tema do Trabalho.....	10
1.2. Problematização.....	10
1.3. Justificativa.....	11
1.4. Objetivos de Pesquisa.....	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1. Tintas Condutivas.....	13
2.2. Propriedades Morfológicas.....	14
2.3. Condução Elétrica.....	17
2.4. Método de Deposição.....	19
2.5. Métodos de Caracterização Elétrica.....	22
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
3.1. Produção da Tinta Proposta.....	25
3.1.1. Materiais Utilizados.....	25
3.1.2. Metodologia Experimental.....	27
3.2. Deposição da Tinta.....	27
3.2.1. Materiais Utilizados.....	28
3.2.2. Metodologia Experimental.....	29
3.3. Caracterização Experimental.....	31
4. RESULTADOS.....	34
4.1. Resultados obtidos pelo método quatro pontas colineares.....	34
4.1.1. Resistência e Resistência de Folha.....	34
4.1.2. Resistividade e Condutividade.....	36
4.2. Análise de curvas tensão-corrente (IV).....	39
4.3. Discussão sobre a morfologia das formulações.....	44
5. CONCLUSÃO.....	52
6. REFERÊNCIAS.....	54
7. ANEXOS.....	57



1. INTRODUÇÃO

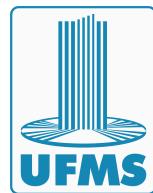
1.1. Tema do Trabalho

Este trabalho tem como tema o desenvolvimento e a caracterização elétrica de tintas condutivas formuladas com estruturas de carbono, aplicadas sobre diferentes substratos. O foco recai sobre a elaboração de filmes uniformes e reproduutíveis, com análise quantitativa de suas propriedades elétricas por meio da técnica de medição de quatro pontas colineares, visando aplicações em dispositivos funcionais de eletrônica impressa.

1.2. Problematização

A evolução das tecnologias de eletrônica impressa tem demandado soluções materiais que conciliem baixo custo, desempenho elétrico estável e compatibilidade com substratos flexíveis. Tintas comerciais à base de metais nobres, como prata e ouro, embora amplamente utilizadas por sua alta condutividade, apresentam custo elevado e risco de processos como eletromigração, o que limita sua viabilidade em contextos experimentais e de larga escala. Como alternativa, metais como cobre e ligas de latão oferecem boa condutividade a custos inferiores, mas são fortemente suscetíveis à oxidação, o que compromete sua estabilidade ao longo do tempo (Dos Santos, 2018).

Neste contexto, materiais carbonáceos emergem como alternativas viáveis para compor tintas condutoras, especialmente em formulações que utilizam compostos como carbon black e óxido de grafeno. No entanto, a complexidade da interação entre os constituintes da tinta (solventes, ligantes e condutores) impõe desafios à obtenção de filmes com adequada aderência, uniformidade e desempenho elétrico estável. Problemas recorrentes como delaminação, variações de resistência e comportamento não linear em medições elétricas indicam a necessidade de aprimoramentos nas rotinas de formulação, deposição e tratamento térmico dos filmes condutores.



1.3. Justificativa

O uso de tintas condutoras tem se consolidado como alternativa estratégica para o desenvolvimento de dispositivos eletrônicos impressos, especialmente em configurações que demandam flexibilidade mecânica e baixo custo de produção. A capacidade de imprimir circuitos diretamente sobre superfícies plásticas ou poliméricas amplia o potencial de aplicação em áreas como sensores, dispositivos vestíveis e etiquetas inteligentes. No entanto, para que essas aplicações sejam viáveis, é necessário formular tintas que apresentem simultaneamente boa aderência, condutividade elétrica estável e resistência à degradação ambiental (Dos Santos, 2018).

O desenvolvimento de tintas à base de carbono representa um caminho promissor nessa direção. Além de acessíveis, materiais como o carbon black e o óxido de grafeno apresentam características estruturais favoráveis à condução elétrica, desde que devidamente dispersos em uma matriz polimérica funcional. A seleção cuidadosa de ligantes e solventes, como o álcool polivinílico e a água deionizada, possibilita a criação de formulações menos tóxicas com potencial de aplicação sobre diversos substratos flexíveis.

A caracterização elétrica dos filmes obtidos exige precisão e confiabilidade, especialmente quando se trata da avaliação de resistência de folha em películas de espessura reduzida. Neste trabalho, adota-se a técnica de medição de quatro pontas colineares, reconhecida por sua capacidade de eliminar interferências associadas à resistência de contato. De acordo com Oka (2000), esta metodologia permite obter medidas confiáveis mesmo em sistemas de baixa espessura e condutividade moderada, desde que respeitadas as correções geométricas adequadas e o controle rigoroso das variáveis de ensaio.

Ao integrar formulações de tintas com estruturas de carbono a uma metodologia de caracterização robusta, o presente estudo visa contribuir para o aprimoramento de tecnologias aplicáveis à eletrônica impressa de baixo custo. Essa abordagem se justifica pela escassez de soluções acessíveis, estáveis e reproduzíveis no contexto acadêmico, e



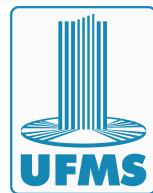
por seu potencial de gerar conhecimento aplicável à síntese de novos materiais funcionais.

1.4. Objetivos de Pesquisa

O objetivo geral desta pesquisa é desenvolver e caracterizar tintas condutivas à base de carbono, otimizadas para aplicação em diferentes substratos, em especial os flexíveis, com foco em parâmetros como aderência, condutividade e estabilidade térmica.

Entre os objetivos específicos, tem-se:

- Avaliar diferentes formulações com variações nos tipos e proporções de solventes, ligantes e agentes condutores;
- Implementar tratamentos térmicos e técnicas de dispersão que promovam maior homogeneidade dos filmes;
- Aplicar o método de medição de quatro pontas colineares para obtenção da resistência elétrica, resistência de folha, resistividade e condutividade;
- Analisar a linearidade das curvas tensão-corrente (curvas IV) para validar a natureza ôhmica dos filmes produzidos.



2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Tintas Condutivas

As tintas condutivas surgiram como solução viável para substituir elementos metálicos tradicionais em dispositivos eletrônicos flexíveis. Com os avanços nos nanomateriais, a década de 2000 foi marcada pela introdução de nanotubos de carbono (CNTs) como agentes condutivos. Esses materiais apresentam vantagens significativas, como alta razão de aspecto, estabilidade térmica e excelente mobilidade eletrônica (Coleman et al., 2006). A incorporação dos CNTs em matriz polimérica permitiu a formação de filmes condutivos ultrafinos, com possibilidades de aplicação em sensores flexíveis.

Ainda no início do século XXI, a busca por alternativas sustentáveis e de baixo custo levou ao desenvolvimento de tintas condutivas à base de grafite/grafeno. Estudos influentes, como o de Secor et al. (2013), demonstraram que o grafeno, derivado da esfoliação do grafite, apresentava condutividade comparável à de metais nobres, mas com custo significativamente menor e menor impacto ambiental. Isso impulsionou pesquisas de tintas com partículas de grafeno dispersas em soluções aquosas.

Recentemente, houve uma intensificação nas pesquisas com materiais híbridos, que unem propriedades metálicas e poliméricas. Iniciativas como a de Oliveira (2022), que desenvolveu uma tinta condutiva de baixo custo utilizando pó de grafite e acetato de celulose, com desempenho compatível com protótipos eletrônicos básicos, abrem portas para uso em escolas técnicas e projetos sociais.

O avanço do estudo da condução elétrica em nanomateriais, é fundamental para o desenvolvimento das tintas condutoras, minimizando a perda de potencial, o que as torna adequadas para aplicações em placas de circuito impresso. O estudo também valida a otimização da composição, visto que a concentração de componentes a base de carbono por exemplo, influenciam na condutividade da tinta (Junqueira, 2012).

As tintas condutivas representam, portanto, um campo em plena expansão, com aplicações transversais que vão da engenharia de materiais à educação científica. A contínua evolução desses compostos, aliada ao desenvolvimento de novas técnicas de



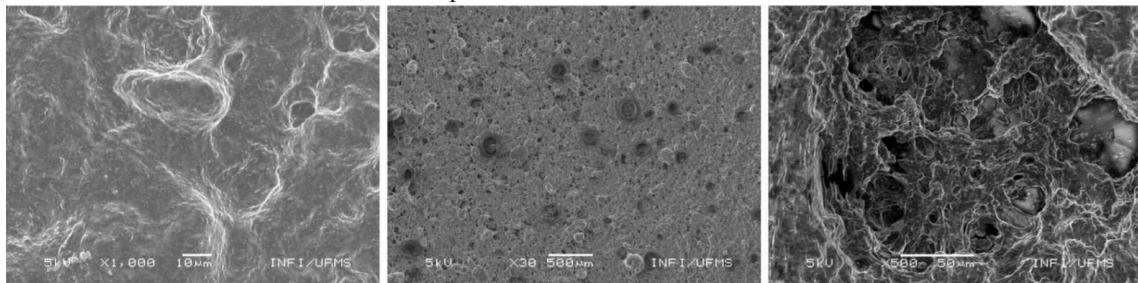
aplicação, aponta para um futuro no qual dispositivos inteligentes poderão ser produzidos em qualquer superfície, com alta eficiência, flexibilidade e acessibilidade (Zhang et al., 2024).

2.2. Propriedades Morfológicas

A morfologia das tintas condutivas define, desde sua deposição até a sinterização, como se formam os caminhos elétricos dentro do filme. Distribuições de partículas, aglomerados, interstícios e vazios são elementos que alteram o fluxo de corrente e elevam a resistência de folha. Uma morfologia densa e homogênea promove menor dispersão de corrente e maior eficiência elétrica, o que torna indispensável a caracterização morfológica prévia (Fernandes et al., 2020).

A técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) revela detalhes essenciais da estrutura superficial: a compactação das partículas, a presença de poros, e eventuais microfissuras formadas durante a evaporação do solvente. A correlação entre imagem morfológica e desempenho elétrico permite a otimização de formulações (Fernandes et al., 2020). A Figura 1, mostra através de imagens obtidas pelo MEV a superfície de uma amostras de tintas condutoras a base de estruturas de carbono após tratamento térmico.

Figura 1. Análise de superfície por MEV de amostras de tinta à base de estruturas de carbono após tratamento térmico.



Fonte: Própria autora (2025).

Outro aspecto crítico é a espessura e a rugosidade do filme depositado. Filmes muito finos podem não formar redes percolantes suficientes; já filmes excessivamente espessos podem originar fissuras internas e delaminações. O controle dessa variável



envolve formulação da tinta, procedimento de deposição, cura térmica e compatibilidade do substrato (Reenaers et al., 2020).

A arquitetura particulada também exerce papel central. Formulações que empregam distribuição bimodal de partículas, como no sistema Ni–Ag core-shell, alcançam preenchimento mais eficiente dos vazios e melhor empacotamento estrutural. Isso resulta em menor porosidade e maior densificação do filme, melhorando a condutividade e a durabilidade dos dispositivos impressos (Pajor-Świerzy et al., 2020). A Tabela 1 apresenta um comparativo entre diferentes estratégias morfológicas de tintas condutivas e seus impactos esperados nos filmes:

Tabela 1. Comparativo entre Tintas Condutivas com Diferentes Cargas Funcionais e Suas Propriedades Morfológicas.

Estratégia morfológica	Distribuição de partículas	Efeito esperado na morfologia	Impacto no desempenho elétrico
Nanopartículas metálicas simples	Monomodal, esférica	Empacotamento convencional	Boa condutividade, menor complexidade
Distribuição bimodal (core-shell)	Partículas grandes + pequenas	Preenchimento de interstícios	Maior densidade, menor resistividade
Materiais carbonáceos dispersos	Flocos, nanotubos	Rede condutora híbrida	Flexibilidade, mas maior desafio morfológico
Matriz biopolimérica + condutor	Partículas em matriz polimérica	Compactação dependente da cura	Sustentável, pode comprometer densidade

Fonte: Elaboração própria com base em Fernandes et al. (2020), Pajor-Świerzy et al. (2020), Reenaers et al. (2020), Sanchez-Duenas et al. (2023) e Naik et al. (2025).

Ainda no âmbito da morfologia, a interação entre a tinta e o substrato determina a qualidade do filme depositado. Substratos com maior rugosidade ou alta absorção podem provocar redistribuição inadequada da tinta, gerando irregularidades morfológicas que afetam a continuidade elétrica. A preparação da superfície, com

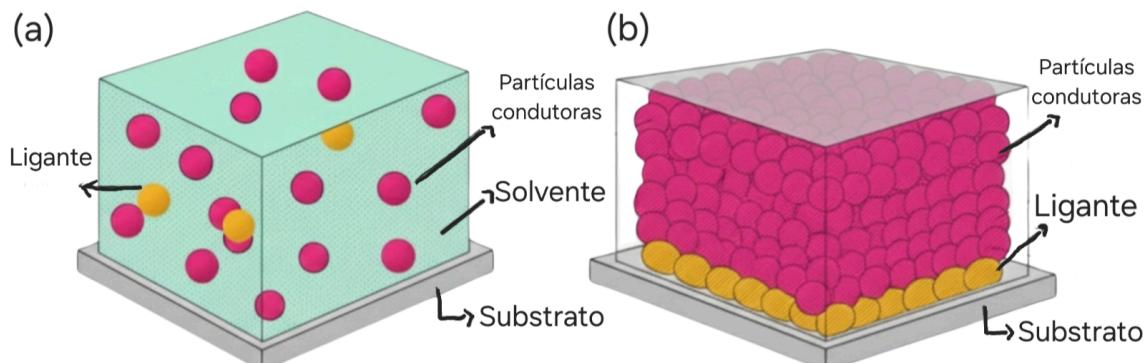


tratamento ou uso de primers é, portanto, uma etapa técnica salientada em estudos recentes (Sanchez-Duenas et al., 2023).

A dispersão, aglomeração e alinhamento dessas partículas são condicionantes diretas da rede de condução. Redistribuições internas ou aglomeração excessiva são causas frequentes de aumento da resistência e instabilidade elétrica. Antes do processo de sinterização, as partículas condutoras estão isoladasumas das outras, sem capacidade de conduzir eletricidade. Durante o processo de sinterização da tinta condutora, o veículo orgânico não condutor volatiliza à medida que a temperatura aumenta, dessa forma a tensão superficial rearranja ordenadamente a fase funcional condutora para que esta atinja a função de condução, conforme ilustrado na Figura 2. (Qin et al., 2023).

Figura 2. Diagrama das partículas condutoras na tinta condutora antes e depois da sinterização:

(a) antes da sinterização; (b) depois da sinterização.



Fonte: Própria autora (2025).

O processo de secagem e cura da tinta define alterações morfológicas que permanecem no filme final. Secagem rápida pode gerar tensões internas e fissuras, enquanto uma cura térmica controlada favorece a compactação das partículas condutoras e a eliminação de solventes residuais, resultando em morfologias de melhor qualidade (Reenaers et al., 2020).

A formulação química também tem impacto direto. A escolha de ligantes, dispersantes e solventes interfere na reologia da tinta e consequentemente na morfologia final. Por exemplo, estudos com nanopartículas de prata demonstram que a relação entre



viscosidade e tensão superficial da tinta altera a compactação e distribuição das partículas no filme (Fernandes et al., 2020).

De fato, estratégias de engenharia da morfologia, como o uso de partículas de diferentes tamanhos, tratamentos de sinterização a baixa temperatura, e polímeros sustentáveis, são essenciais para conciliar desempenho elétrico elevado e flexibilidade mecânica (Sanchez-Duenas et al., 2023). Sendo assim, ao se formular tintas condutivas para substratos flexíveis e aplicações impressas, o controle morfológico deve ser integrado desde a seleção da matéria-prima até o ensaio de desempenho (Pajor-Świerzy et al., 2020).

2.3. Condução Elétrica

Tintas condutivas são formuladas para permitir a passagem de corrente elétrica, a condutividade elétrica dessas tintas depende dos materiais condutivos incorporados à sua fórmula. Segundo Santos (2018), as tintas condutivas que utilizam materiais metálicos de boa condutividade apresentam baixa resistência elétrica, o que as torna adequadas para aplicações em placas de circuito impresso, onde a perda de potencial deve ser minimizada.

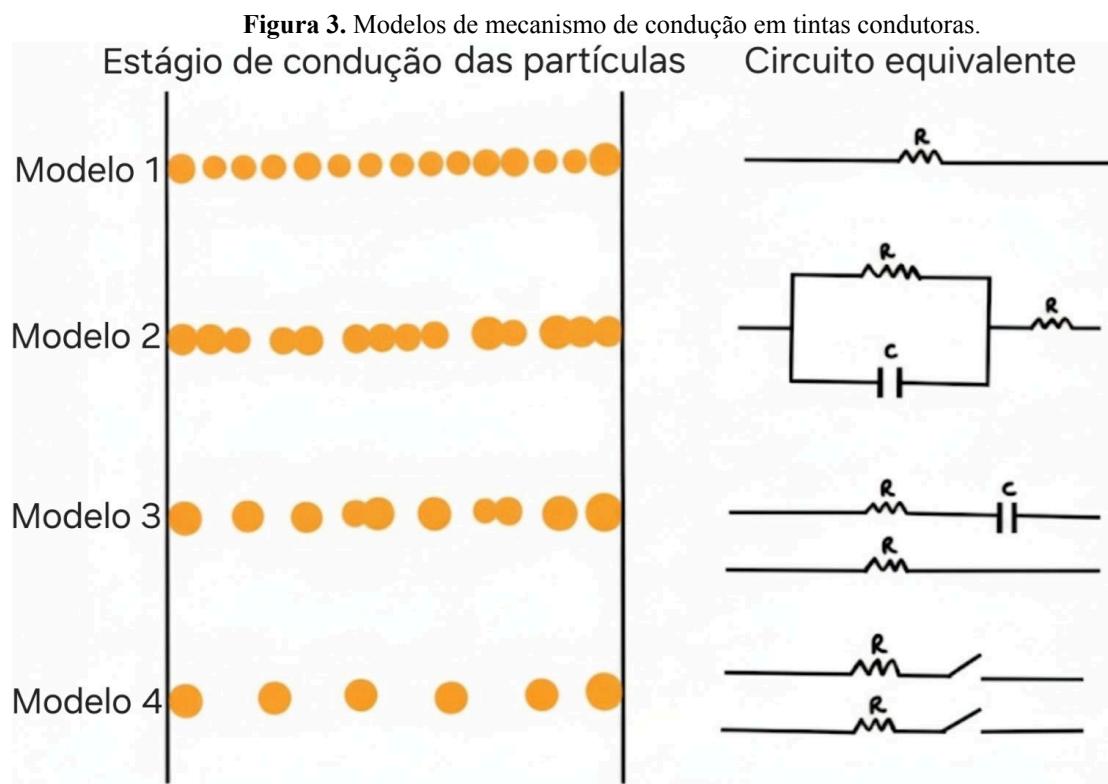
A estrutura dos materiais utilizados nas tintas condutivas é fundamental para alcançar alta condutividade elétrica. A perfeita dispersão e interconexão das partículas condutivas na matriz polimérica formam caminhos para o transporte eficiente da corrente elétrica (Paula, 2013)

Outro aspecto importante é a concentração dos componentes condutivos, como negro de fumo (carbon black) e metais, que influenciam diretamente a resistência elétrica da tinta. Conforme estudo de Junqueira (2012), a concentração do negro de fumo em uma tinta condutiva altera a resistividade da amostra, evidenciando que a otimização da composição é essencial para maximizar a condutividade elétrica e garantir a funcionalidade adequada da tinta.

De acordo com Qin et al.,(2023), partículas condutoras que estão em contato direto e contínuo representam um circuito equivalente a uma resistência pura tendo um



caminho condutor bem estabelecido. Quando estão muito próximas, mas separadas por uma camada isolante estreita, o circuito é representado por um resistor e capacitor em paralelo, conectados em série com uma resistência, representando a necessidade dos elétrons em tunelar através da barreira isolante. Já para as partículas mais espaçadas, o circuito RC é ativado quando a alta voltagem rompe a barreira capacitiva. As partículas quando dispersas e isoladas, representam um circuito de chave aberta, significando que não há condução. A Figura 3 apresenta cada uma dessas comparações.



Fonte: Própria autora (2025).

Sendo assim, a condução elétrica em tintas condutivas depende de sua microestrutura e composição. A baixa resistência ideal é atingida pela seleção de materiais de alta condutividade, onde as variações na concentração desses componentes alteram drasticamente a resistividade, mostrando que um arranjo denso de partículas em contato direto resulta em um caminho condutivo bem definido.



2.4. Métodos de Deposição

A escolha do método de deposição é determinante para a performance elétrica, adesão e integridade morfológica de tintas condutivas aplicadas em substratos flexíveis ou rígidos. Dentre as técnicas exploradas na literatura, destacam-se impressão a jato de tinta (inkjet), serigrafia, rotogravura, spray coating e deposição por lâmina. A compatibilidade entre o método, o tipo de substrato e a formulação da tinta define a espessura, resolução e uniformidade da camada condutiva final (Qin et al., 2023).

A serigrafia é amplamente utilizada por sua robustez e flexibilidade em escala industrial, especialmente quando se trabalha com tintas à base de nanopartículas metálicas ou carbono (Qin et al., 2023). Segundo Zavanelli e Yeo (2021), essa técnica oferece excelente controle de deposição, permitindo estruturas condutoras estáveis mesmo em dispositivos deformáveis. Sua eficiência, no entanto, depende diretamente da viscosidade da tinta e da malha da tela utilizada.

A impressão inkjet, por outro lado, destaca-se pela precisão e capacidade de deposição digital sob demanda, sem contato físico direto com o substrato. Essa característica favorece aplicações em microeletrônica e sensores vestíveis, onde a resolução e o baixo desperdício são prioritários. Contudo, o método exige tintas com propriedades reológicas rigorosas, o que pode limitar sua aplicabilidade (Qin et al., 2023).

Segundo Howard et al., (2019) a spray coating se apresenta como uma alternativa versátil e amplamente utilizada devido às vantagens de baixo desperdício de material e processamento de alto rendimento para coberturas homogêneas sobre grandes áreas. Para eletrodos impressos via spray, a otimização da pressão, distância e temperatura de deposição é crucial para garantir condutividade satisfatória e adesão eficaz (Zavanelli; Yeo, 2021).

A deposição por rotogravura, embora menos frequente em laboratórios, tem ganhado espaço por sua alta velocidade e compatibilidade com processos de impressão em rolo (roll-to-roll). Esse método é promissor para a fabricação em massa de eletrônicos sustentáveis, especialmente quando aliado a tintas à base de carbono com



baixa toxicidade (Wiklund et al., 2021).

O método de deposição por lâmina (*blade coating*), uma técnica robusta caracterizada pelo seu baixo custo de investimento e adequação tanto a substratos rígidos quanto à flexíveis. O princípio de operação é direto: a tinta é dispensada sobre o substrato e, em seguida, uma lâmina é movida em relação ao substrato para espalhar o material e depositar um filme uniforme. Conforme descrito por Howard et al. (2019), esta abordagem é altamente eficaz para a deposição de películas finas, garantindo a cobertura total do substrato. A Figura 4, ilustra o método de deposição citado.

Figura 4. Ilustração do método de deposição por lâmina.



Fonte: Própria autora (2025).

Os métodos de deposição também devem considerar a natureza do substrato, como celulose, PET, papel técnico ou PLA, segundo Sanchez-Duenas et al. (2023), substratos biodegradáveis requerem métodos de baixa temperatura e mínima agressividade mecânica, o que favorece a impressão inkjet, serigrafia e deposição por lâmina com tintas de baixa energia superficial. A Tabela 2 apresenta as principais técnicas de deposição utilizadas para tintas condutivas, considerando critérios técnicos como resolução, escalabilidade, compatibilidade com substratos e custo:



Tabela 2. Comparativo técnico entre métodos de deposição de tintas condutivas.

Método	Resolução	Compatível com Substratos Flexíveis	Custo	Escalabilidade
Serigrafia	Média	Alta	Baixo	Alta
Inkjet	Alta	Média	Médio	Média
Spray Coating	Média	Alta	Baixo	Alta
Rotogravura	Alta	Alta	Alto	Muito alta
Deposição por Lâmina	Média	Alta	Baixo	Alta

Fonte: Elaboração própria com base em Qin et al., (2023) , Wiklund et al., (2021) e Howard et al.,(2019).

Além dos aspectos técnicos, a sustentabilidade e a reciclagem das camadas condutivas ganham relevância. A integração entre tintas com base vegetal ou em água e métodos como inkjet e spray coating representa um avanço para reduzir impactos ambientais e ampliar a segurança ocupacional nas etapas de produção (Wiklund et al., 2021).

Para Zavanelli e Yeo (2021) outro fator relevante é a influência da morfologia da camada impressa na condutividade final do dispositivo. Deposições irregulares ou com formação de aglomerados comprometem o desempenho elétrico, mesmo quando os materiais condutivos são de alta qualidade. Por isso, técnicas como rotogravura e serigrafia e deposição por lâmina são preferidas em aplicações que exigem robustez elétrica e estabilidade mecânica.

À medida que as exigências por eletrônicos mais leves, flexíveis e sustentáveis aumentam, torna-se indispensável o domínio dos métodos de deposição em suas diversas variantes. A customização das variáveis de impressão, como temperatura, velocidade e tipo de substrato, assume papel técnico de destaque.

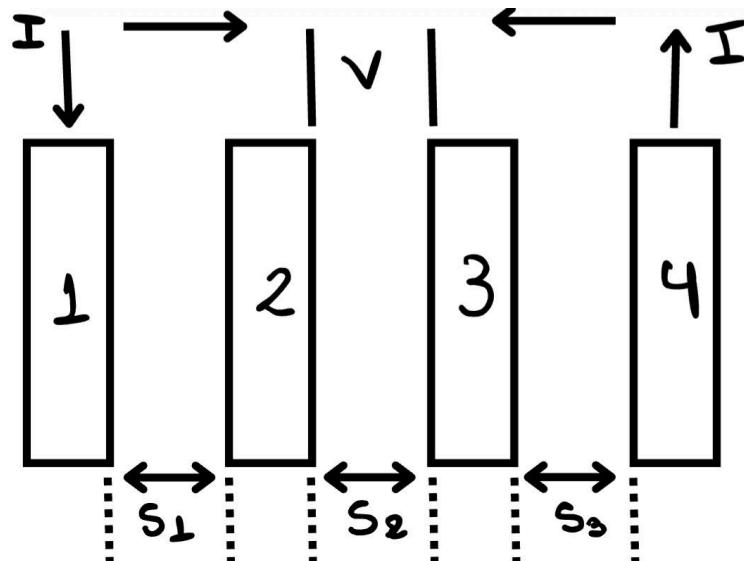


2.5. Métodos de Caracterização Elétrica

A caracterização elétrica é indispensável na avaliação de tintas condutivas, pois fornece dados objetivos sobre sua funcionalidade em circuitos e dispositivos. Entre os métodos mais empregados destacam-se a técnica das quatro pontas colineares, reconhecida por sua precisão na medição da resistividade superficial, e a análise corrente versus tensão (IV), capaz de revelar o comportamento elétrico global da amostra sob diferentes regimes de polarização (Sousa et al., 2023).

No método de quatro pontas, dois eletrodos externos aplicam corrente elétrica (I), enquanto outros dois centrais medem a diferença de potencial (V) gerada, o que elimina interferências relacionadas à resistência de contato. A padronização do espaçamento (s) entre as pontas e o controle da força aplicada são fatores que influenciam diretamente a qualidade da medição (Sousa et al., 2023). A Figura 5, mostra o esquema empregado no método quatro pontas.

Figura 5. Geometria empregada na medida de quatro pontas.



Fonte: Própria autora (2025).

Por sua vez, a análise IV fornece um panorama mais amplo do comportamento elétrico do material. Aplicando-se uma tensão crescente e medindo-se a corrente



resultante, é possível construir curvas que indicam se o material segue um padrão ôhmico linear ou apresenta comportamento não linear, como saturações, histereses ou zonas de transição resistiva (Alarfí, 2019).

Nos estudos mais recentes, a combinação entre ambos os métodos têm sido cada vez mais adotada. Por exemplo, Knopf et al. (2016) utilizaram quatro pontas para medir a condutividade inicial de tintas à base de grafeno, enquanto aplicaram a técnica IV para observar o comportamento do material sob flexão mecânica, reproduzindo condições reais de uso em dispositivos dobráveis. A Tabela 3 apresenta um comparativo entre os dois métodos, destacando os aspectos técnicos que orientam a sua aplicação:

Tabela 3. Comparativo entre os métodos de caracterização elétrica.

Critério	Método de Quatro Pontas	Método Corrente x Tensão (IV)
Parâmetro medido	Resistividade superficial	Condutividade total e regime elétrico
Resistência de contato	Eliminada	Presente e influente
Tipo de análise	Estática e pontual	Dinâmica e funcional
Equipamento necessário	Sonda de quatro agulhas	Fonte de tensão e amperímetro
Ideal para	Filmes finos, substratos rígidos	Materiais híbridos, sensores, têxteis
Sensibilidade a defeitos locais	Alta	Média a alta

Fonte: Elaboração própria adaptado de Sousa et al., (2023); Knopf et al., (2016); Alarfí (2019), Oka (2000).

Os dados supramencionados permitem concluir que a técnica de quatro pontas oferece vantagens em termos de precisão e controle, sendo mais adequada quando se busca avaliar a qualidade do filme condutor em condições estáveis. Em relação à prática desenvolvida neste projeto, a caracterização será realizada majoritariamente pela técnica de quatro pontas, dada a relevância de se obter valores precisos de resistividade



superficial nas amostras de tinta proposta. No entanto, curvas IV complementares serão utilizadas para avaliar o comportamento sob diferentes tensões e investigar possíveis regiões de saturação ou instabilidade.

O comportamento elétrico fundamental de um material é regido pela Lei de Ohm, que estabelece a relação linear entre a tensão (V) aplicada, a corrente elétrica (I) resultante e a resistência (R) do material. Esta resistência, que quantifica a oposição de um condutor à passagem de corrente, é definida pela razão entre a tensão e a corrente. Desta forma, a resistência é expressa pela Equação (1):

$$R = \frac{V}{I} \quad (1)$$

O conceito fundamental para a caracterização elétrica de filmes condutores está na resistividade (ρ), que representa a resistência intrínseca do material à passagem de corrente. Segundo Oka (2000), para o caso em que as pontas do dispositivo se encontram igualmente espaçadas ($s = s_1 = s_2 = s_3$), a equação da resistividade mostra que essa grandeza é diretamente proporcional à tensão (V) e ao espaçamento dos eletrodos (s), por outro lado é inversamente proporcional à corrente (I), conforme expresso na Equação (2):

$$\rho = 2\pi s \frac{V}{I} = 2\pi s R \quad (2)$$

Ainda de acordo com Oka (2000), ao se tratar de filmes finos é usual avaliá-los, não em termos de resistividade, mas em termos de resistência de folha (R_s), que é uma grandeza utilizada em substituição à resistividade volumétrica (ρ) quando a espessura (t) do filme é significativamente menor que o comprimento (l) e a largura (w) da amostra. A relação entre resistência, resistividade e resistência de folha é dada pela Equação (3):

$$R = \rho \frac{l}{wt} = R_s \frac{l}{w} \quad (3)$$



A condutividade (σ) é o inverso direto da resistividade e mede a facilidade com que um material transporta uma carga elétrica. Ela é calculada a partir da resistividade (ρ), como mostra a Equação (4):

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (4)$$

A compreensão da Lei de Ohm e a aplicação rigorosa das equações de resistência (R), resistividade (ρ), resistência de Folha (R_s) e condutividade (σ) são fundamentais para análises do desempenho de tintas condutivas a partir da caracterização dos filmes produzidos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Produção da Tinta Proposta

A produção da tinta condutiva desenvolvida neste projeto envolveu a formulação de três tipos distintos de dispersões: uma à base de acetona e duas à base de água desionizada. O objetivo foi avaliar o desempenho elétrico e a viabilidade de aplicação de cada uma no contexto de eletrônica impressa com materiais alternativos. Ambas as tintas tiveram como elemento condutor o negro de fumo (carbon black), amplamente utilizado em formulações de baixo custo devido à sua boa condutividade elétrica e estabilidade química. Uma delas teve ainda o óxido de grafeno como agente condutivo auxiliar, com intenção de usufruir de sua condutividade, leveza e flexibilidade.

3.1.1. Materiais Utilizados

Os materiais empregados na produção das tintas condutoras foram selecionados a partir de sucessivos testes que buscaram otimizar a aderência, a uniformidade e a condutividade dos filmes produzidos. Para isso, foram utilizados componentes agrupados em três categorias principais: solventes, ligantes e materiais condutores.



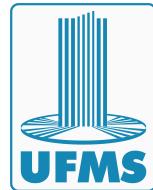
Cada formulação base utilizou uma combinação distinta desses elementos para atender aos critérios desejados de desempenho elétrico e aderência ao substrato.

Tabela 4. Materiais utilizados nas formulações ACCB, PVACB e PVACBGO.

Componente	Fabricante/ origem	Informações/ grau	Função	Formulação utilizada
Acetona	Neon	P.A. (para análise)	Solvente	ACCB
Base de unha	Ludurana	Cosmético (resina polimérica)	Ligante	ACCB
Carbon black	CABOT	Pó de alta pureza	Condutor	ACCB, PVACB e PVACBGO
Água deionizada	Laboratório AND Group	Grau reagente	Solvente	PVACB e PVACBGO
Polivinil álcool (PVA)	ALDRICH	Pó de alta pureza	Ligante	PVACB e PVACBGO
Óxido de grafeno	Laboratório AND Group	Dispersão Aquosa (4,95 mg/mL)	Condutor adicional	PVACBGO

Fonte: Elaboração Própria (2025).

Os materiais descritos na Tabela 4 foram fundamentais para o desenvolvimento das três tintas tintas: ACCB, baseada em acetona, base de unha e carbon black, PVACB e PVACBGO, compostas por água deionizada, PVA, carbon black, e no caso da última, óxido de grafeno. A seleção criteriosa desses elementos foi resultado de múltiplos testes experimentais que buscaram garantir boa adesão ao substrato, condutividade elétrica satisfatória e viabilidade de aplicação para eletrodos flexíveis. Os detalhes exatos da proporção entre os componentes não foram divulgados a fim de preservar a viabilidade de um futuro pedido de patente.



A exclusão do Óxido de Grafeno das tintas à base de acetona deveu-se à incompatibilidade da sua solução aquosa com a acetona e a base de unha, o que comprometeria a homogeneidade final do produto.

3.1.2. Metodologia Experimental

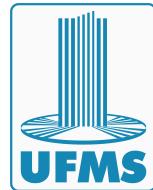
O processo de produção das tintas condutoras envolveu, inicialmente, a seleção dos materiais para cada formulação, sendo estes classificados como solventes, ligantes e materiais condutores. Foram formuladas três tintas principais: ACCB, composta por acetona, base de unha e carbon black; PVACB e PVACBGO, compostas por água desionizada, polivinil álcool (PVA), carbon black, e no caso da última, óxido de grafeno. Para ambas as formulações, a metodologia experimental foi conduzida com foco na uniformidade dos filmes, aderência ao substrato e boa dispersão dos componentes.

A preparação das tintas seguiu um protocolo padronizado. Primeiramente, os solventes foram misturados aos ligantes sob agitação magnética vigorosa. Em seguida, o material condutor foi adicionado lentamente à mistura. Após essa etapa inicial, a dispersão dos sólidos foi aprimorada por meio do uso de um ultrassom de ponta. Esse processo visou promover a desaglomeração das partículas condutoras e a homogeneização completa do sistema.

3.2. Deposição da Tinta

A aplicação das tintas condutivas desenvolvidas foi realizada utilizando o método de deposição por lâmina da tinta sobre os substratos flexíveis de plástico e sobre os substratos rígidos de vidro. Esse método foi escolhido pela facilidade de execução e por permitir controle visual direto da espessura e cobertura do filme condutor. Cada tinta foi aplicada de forma uniforme em toda a área retangular, dos substratos utilizados, o que garantiu maior padronização das amostras.

Após a aplicação, os filmes foram submetidos ao processo de secagem sob iluminação de luz infravermelho, esse procedimento visou promover a evaporação



controlada dos solventes, evitando defeitos como fissuras ou bolhas no revestimento. As amostras também passaram por tratamento térmico utilizando a estufa, com a intenção de aprimorar as propriedades condutivas das formulações.

Todas as amostras foram mantidas em ambiente livre de poeira até o completo resfriamento, o que garantiu boa aderência ao substrato e melhor estabilidade superficial para a etapa de caracterização elétrica.

3.2.1. Materiais Utilizados

A etapa de deposição da tinta foi precedida pela seleção e organização dos materiais adequados tanto para a aplicação sobre os substratos quanto para o processo de secagem. Os substratos escolhidos foram plástico (capa de caderno flexível) e placas de vidro (lâmina de microscópio), ambos com as mesmas dimensões e com superfície limpa garantindo condições padronizadas de aderência. A aplicação das formulações foi realizada pelo método de deposição por lâmina da tinta sobre a superfície do substrato e espalhamento com lâmina de vidro, escolhido por oferecer maior controle manual da área de contato.

Para o procedimento de secagem e fixação do material condutor, foi utilizada luz infravermelho. Para o processo de cura, uma estufa de laboratório com controle de temperatura em 100 °C foi fundamental para a padronização das amostras submetidas ao aquecimento. A seguir, a Tabela 5 apresenta os principais materiais empregados nesta etapa, separados por formulação.



Tabela 5. Materiais utilizados na deposição das formulações ACCB, PVACB e PVACBGO.

Categoria	ACCB	PVACB	PVACBGO
Substrato	Plástico (capa de caderno plástica flexível) Vidro (lâmina de microscópio)		
Aplicador		Lâmina de microscópio (Global Class 7105 fosca lapidada)	
Luz de secagem		Infravermelho (Philips PAR38 IR Red 150W)	
Estufa de secagem		Estufa a 100 °C (FANEM Modelo 315 SE)	
Equipamento auxiliar		Placa para suporte das amostras	
Ambientes de manuseio	Bancada limpa, temperatura ambiente controlada		

Fonte: Elaboração própria (2025).

A organização dos materiais garantiu a repetibilidade dos testes de aplicação e reduziu interferências externas no desempenho das formulações. A metodologia visou não apenas a avaliação da condutividade, mas também a observação da integridade física do filme após o processo de deposição e secagem.

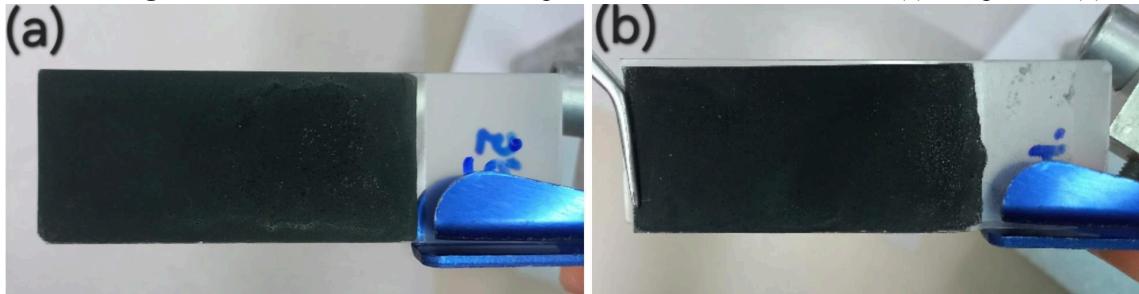
3.2.2. Metodologia Experimental

A metodologia de deposição consistiu na aplicação manual das tintas formuladas sobre substratos de vidro e plástico previamente higienizados com álcool isopropílico, utilizando pelo método de deposição por lâmina para o espalhamento garantindo uniformidade e controle da espessura do traço. Para cada tinta, foram preparados dez filmes condutores, sendo cinco em substrato plástico e cinco em substrato de vidro, as tintas foram aplicadas sobre os substratos no formato de filmes retangulares. Cada formulação (ACCB, PVACB e PVACBGO) foi aplicada separadamente em traços lineares de mesma espessura. A aplicação foi realizada em bancada limpa e ambiente



ventilado, sob condições de temperatura controlada. A Figura 6 mostra o padrão das amostras da tinta PVACB após deposição em vidro (a) e em substrato plástico (b).

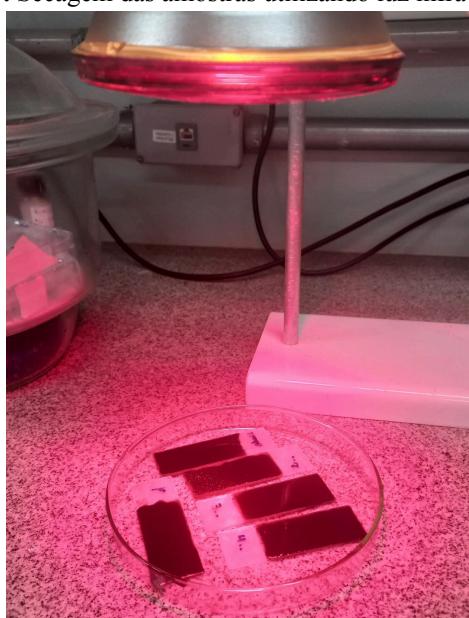
Figura 6. Amostras de tinta PVACB depositadas em substratos de vidro (a) e de plástico (b).



Fonte: Própria autora (2025).

Após a deposição, as amostras foram submetidas ao processo de secagem sob iluminação e calor de luz infravermelho por 10 minutos, esse processo visou promover a evaporação dos solventes e melhorar a adesão e coesão da camada condutora. Em seguida, elas foram medidas e levadas à estufa para tratamento térmico a 100°C por 20 minutos, para depois serem medidas novamente. A Figura 7 mostra as amostras secando com o uso da luz infravermelho.

Figura 7. Secagem das amostras utilizando luz infravermelho.



Fonte: Própria autora (2025).

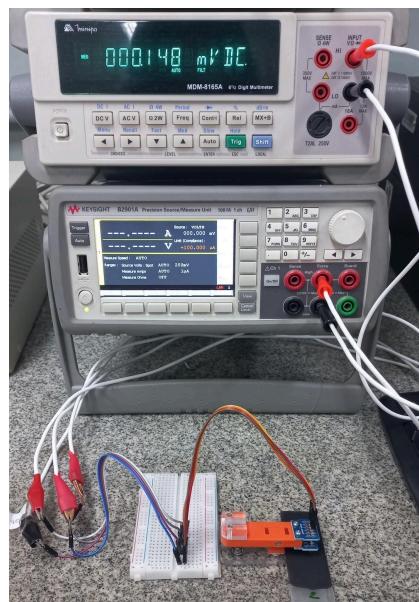


Ao final de cada processo de sinterização, as amostras foram resfriadas à temperatura ambiente por 10 minutos, evitando choques térmicos antes do manuseio e caracterização elétrica. Durante a fase de aplicação e secagem inicial, observou-se uma incompatibilidade entre a formulação da tinta ACCB (à base de acetona) e o substrato plástico. O filme de tinta ACCB apresentou falhas de adesão e descascamento imediato. Em decorrência dessa instabilidade, não foi possível realizar quaisquer medições de propriedades elétricas para a tinta ACCB nos substratos plásticos, sendo estes testes descontinuados para esta combinação.

3.3. Caracterização Experimental

A etapa de caracterização elétrica dos filmes ocorreu por meio da técnica de quatro pontas colineares, reconhecida por sua precisão na medição da resistividade de filmes condutores finos. O sistema experimental utilizado, apresentado na Figura 8, foi montado em bancada, com um dispositivo de quatro agulhas metálicas igualmente espaçadas, acopladas a uma fonte de tensão e a um multímetro digital.: (i) SourceMeter B2900A e (ii) Multímetro Digital MDM-8165A.

Figura 8. Sistema experimental utilizado para caracterização elétrica.

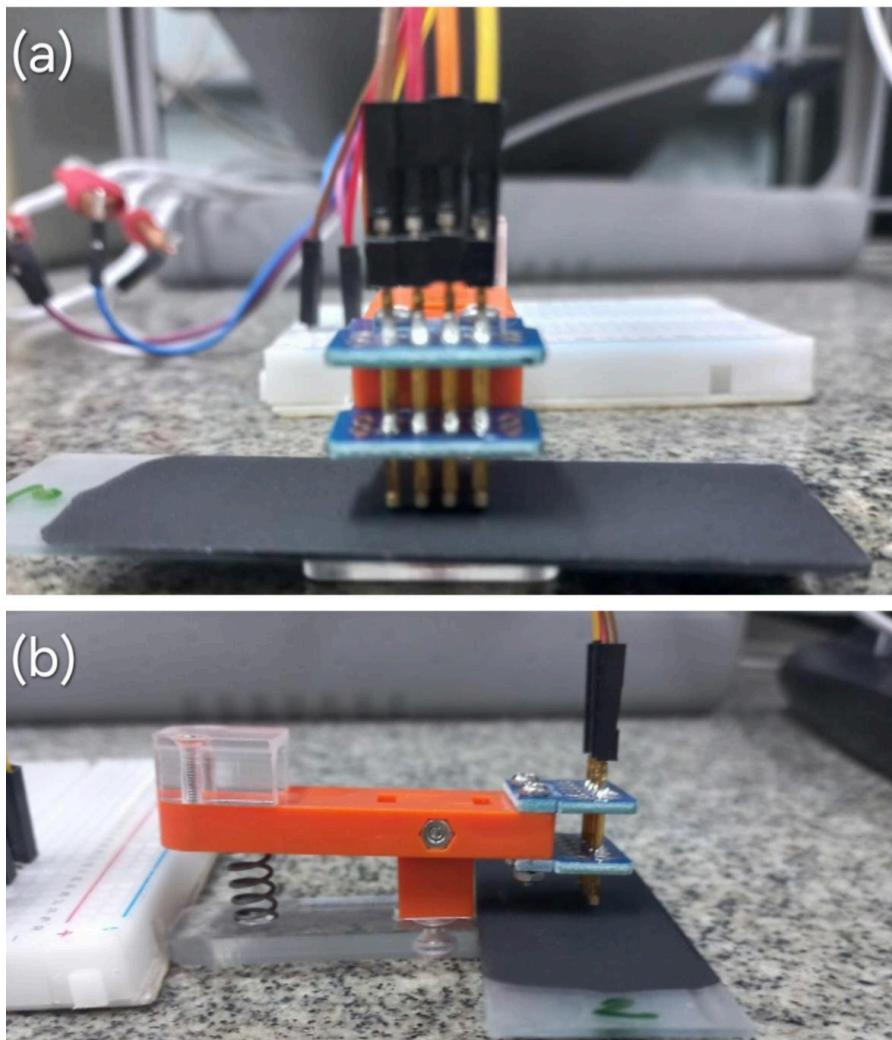


Fonte: Própria autora (2025).



A corrente foi aplicada através dos dois contatos externos, enquanto a diferença de potencial foi medida entre os dois internos.. Para cada formulação testada, foram realizadas três medições, com o objetivo de minimizar erros experimentais e garantir confiabilidade nos dados obtidos. A Figura 9, mostra a disposição dos pinos no dispositivo de medição pela técnica de quatro pontas colineares, em relação a amostra, sendo: (a) visão frontal e (b) visão lateral do dispositivo.

Figura 9. Visão frontal (a) e visão lateral (b) do dispositivo de medida utilizado no método de quatro pontas colineares.



Fonte: Própria autora (2025).



A Tabela 6 apresenta os principais parâmetros operacionais utilizados durante o processo de caracterização elétrica.

Tabela 6. Parâmetros do ensaio elétrico por quatro pontas.

Parâmetro	Especificação
Técnica de medição	Quatro pontas e IV
Substrato utilizado	Plástico e Vidro
Dimensão amostra	0,025 m x 0,054 m
Espaçamento entre as pontas	0,002 m
Temperatura ambiente	24 °C ± 1 °C
Número de repetições	3 por amostra
Multímetro utilizado	Digit Multimeter MDM-8165A
Voltímetro utilizado	Source Metter B2900A

Fonte: Elaboração Própria (2025).

Os dados coletados por meio dessa caracterização permitiram identificar variações relevantes na condutividade elétrica entre as formulações, sendo possível relacionar os resultados obtidos à composição e ao método de deposição de cada tinta. Essa etapa foi essencial para validar a eficiência elétrica das formulações propostas através das equações (1) a (4), e fornecer subsídios para futuras otimizações no processo de fabricação das tintas condutivas.



4. RESULTADOS

4.1. Resultados obtidos pelo método quatro pontas colineares

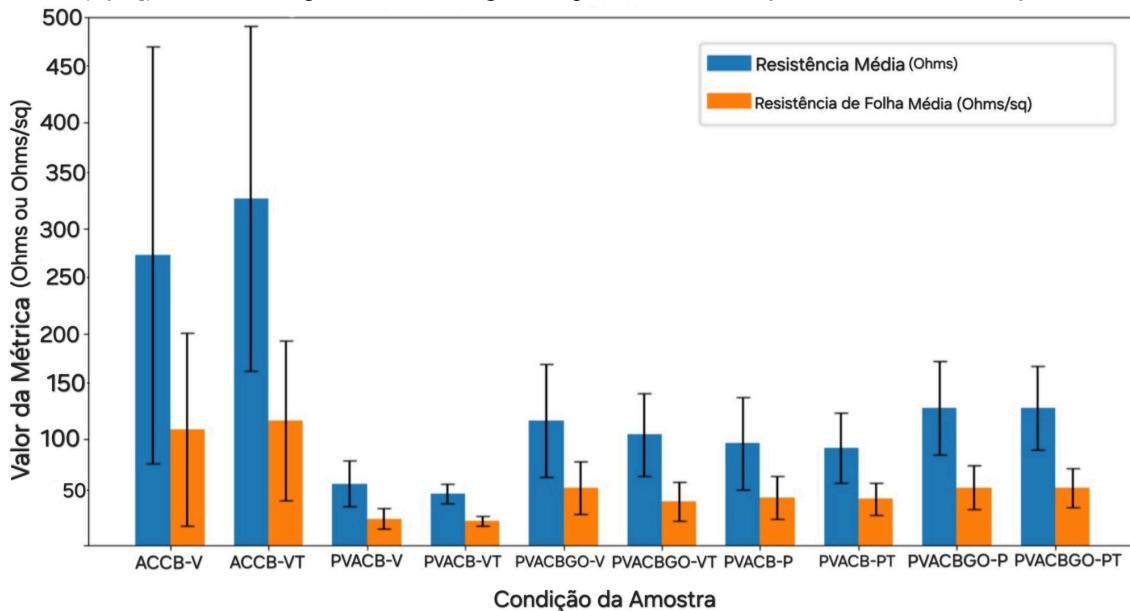
4.1.1. Resistência e Resistência de Folha

A partir das medições realizadas conforme abordado na seção anterior, o valor de resistência para cada amostra foi obtido a partir dos valores de tensão e corrente obtidos, tendo tais valores aplicados à Lei de Ohm, conforme estabelecido na Equação (1). As Tabelas 7 e 8, apresentadas na Seção 7 (anexos), mostram os resultados de resistência média (R), em Ω , obtidos para as tintas ACCB, PVACB e PVACBGO. Cada valor corresponde à média de três medições por amostra (cinco amostras para cada condição).

Os valores de resistência média apresentados nas Tabelas 7 e 8 foram convertidos em resistência de folha (R_s), utilizando a Equação (3), que utiliza os parâmetros geométricos de comprimento (l) e largura (w) das amostras em metros. As Tabela 9 e 10, presentes nos anexos, apresentam os valores médios de R_s expressos na unidade Ω/sq (Ohms por quadrado) para cada formulação. A Figura 11, mostra que com tais valores, foi possível calcular a média entre os valores de resistência média e de resistência de folha média obtidos para as cinco amostras em cada caso (formulação/condição de substrato), juntamente com seu desvio padrão, possibilitando a construção do gráfico apresentado na Figura 10.



Figura 10. Gráfico comparativo da Média das Resistências Média (Ω) e Resistências de Folha Média (Ω/sq), com seus respectivos desvios padrão, para cada formulação de tinta e sua condição.



Fonte: Elaboração Própria.

Os resultados obtidos nas Tabelas de 7 a 10 juntamente com o gráfico construído revelam diferenças acentuadas entre as formulações, a influência do substrato e o efeito do tratamento térmico.

A tinta ACCB apresentou a pior performance geral, tanto em resistência média (entre 275 Ω e 328 Ω) quanto em resistência de folha média (entre 110 Ω/sq e 118 Ω/sq). Além disso, os desvios padrão são extremamente altos (cerca de 197 Ω). Isso indica que a alta volatilidade da acetona resultou em filmes muito desuniformes e de baixa reproduzibilidade. O tratamento térmico piorou ligeiramente o desempenho de R e Rs, sugerindo que o calor da estufa a 100 °C causou uma retração da matriz polimérica, quebrando micro conexões.

A formulação PVACB demonstrou ser a melhor condutora e a mais estável, apresentando a menor resistência média (mínimo de 49,01 Ω) e resistência de folha média (mínimo de 22,72 Ω/sq), que foram atingidas no substrato de vidro tratado. Os desvios padrão também são os menores, particularmente no vidro tratado (PVACB-VT, com 4,35 Ω/sq), indicando filmes de excelente uniformidade e alta reproduzibilidade.

A tinta PVACBGO teve um desempenho intermediário, com resistência e resistência de folha superiores à PVACB, mas muito inferiores à ACCB, Rs manteve-se



entre $41,51 \Omega/sq$ e $54,67 \Omega/sq$. A presença do óxido de grafeno, na concentração utilizada, pode ter introduzido uma resistência de contato interfacial mais alta, impedindo que a condutividade superasse a do carbon black puro. Já o tratamento térmico foi pouco benéfico, quase neutro para as formulações aquosas (PVACB e PVACBGO).

Ao comparar a melhor performance das tintas em cada substrato, os filmes depositados em substrato de vidro resultaram em menor resistência e melhor uniformidade em comparação com o plástico, indicando que a rigidez do substrato favorece a formação de uma rede condutiva mais densa e coesa.

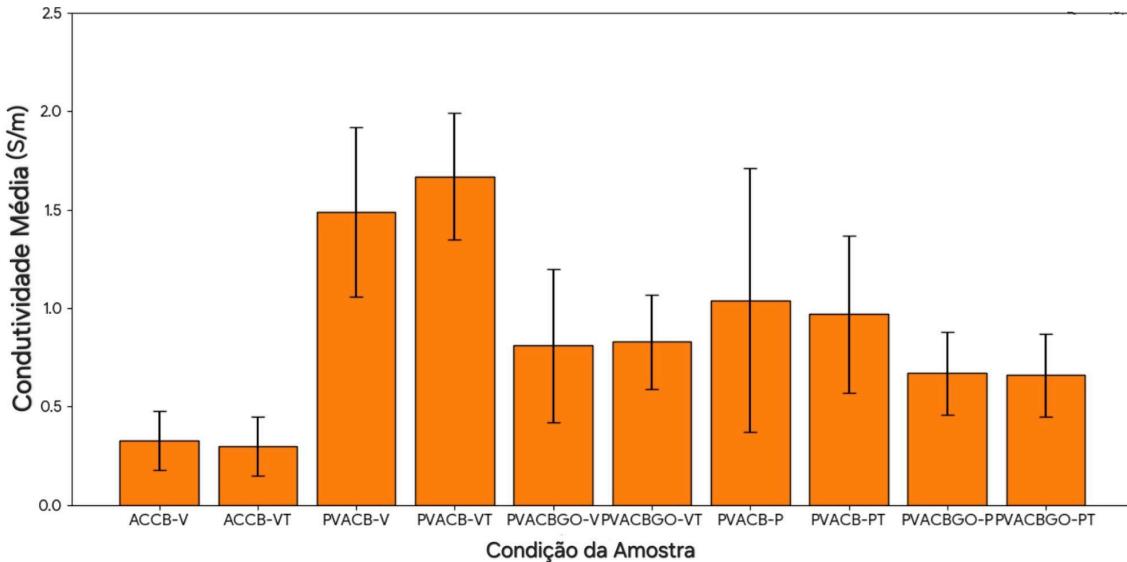
4.1.2. Resistividade e Condutividade

Também utilizou-se os valores de resistência média para calcular a resistividade (ρ) das amostras. Este cálculo foi realizado aplicando a Equação (2), utilizando também o valor do espaçamento (s) entre as pontas do dispositivo de medida para o cálculo. As Tabelas 11 e 12, da Seção 7 apresentam os valores médios de resistividade, expressos em $\Omega.m$.

Os valores de Condutividade foram obtidos a partir dos dados de resistividade média (ρ) apresentados nas Tabelas 11 e 12, por meio da relação de inversão estabelecida na Equação (4). As Tabelas 13 e 14, em anexos, resumem os resultados de condutividade média (σ), expressos em S/m , para cada formulação. Com tais valores, foi possível calcular a média entre os valores de condutividade obtidos para as cinco amostras em cada caso (formulação/condição de substrato), juntamente com seu desvio padrão, possibilitando a construção do gráfico apresentado na Figura 11.



Figura 11. Gráfico da Média das Condutividades Média (S/m) com seu respectivo desvio padrão.

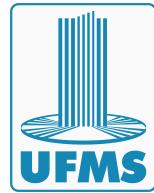


Fonte: Elaboração Própria.

Através do gráfico e dos resultados de resistividade e condutividade obtidos, temos que a PVACB é a formulação mais eficiente, uma vez que atingiu o pico de desempenho em substrato de vidro tratado (PVACB-VT), com a menor resistividade ($0,62 \Omega \cdot m$) e, consequentemente, a maior condutividade (1,67 S/m) como mostrado no gráfico. Ela apresenta também os menores desvios padrão na resistividade, especialmente após o tratamento térmico (0,12 $\Omega \cdot m$ para PVACB-VT), confirmando a formação de um filme homogêneo e confiável.

O desempenho da tinta PVACBGO foi intermediário, sua resistividade média no vidro (entre $1,32$ e $1,48 \Omega \cdot m$) é cerca de duas vezes maior que a da PVACB. Isso se reflete em valores de condutividade ($\approx 0,67$ a $0,83$ S/m) que são significativamente inferiores. Este resultado sugere que a inclusão do óxido de grafeno, na proporção utilizada, não resultou em um efeito sinérgico que superasse a resistência de contato entre as partículas, limitando a condutividade do filme final.

A ACCB é a formulação menos viável, sua resistividade ($3,83$ a $4,13 \Omega \cdot m$) é a mais alta, resultando na menor condutividade (0,3 a 0,33 S/m), cerca de cinco vezes pior que a tinta PVACB. O desvio padrão da resistividade é alto (até $2,49 \Omega \cdot m$), superando a média. Isso demonstra que a formulação acetona/base de unha levou à formação de filmes não confiáveis.



O tratamento térmico a 100 °C teve efeitos distintos dependendo da tinta e do substrato, confirmando a complexidade da otimização: na formulação PVACB em vidro, o tratamento térmico foi benéfico. A resistividade diminuiu (0,73 para 0,62 Ω.m), e a condutividade aumentou (1,49 para 1,67 S/m), indicando que o calor otimizou a compactação da rede condutiva. Em plástico não se observou grandes variações para tal formulação.

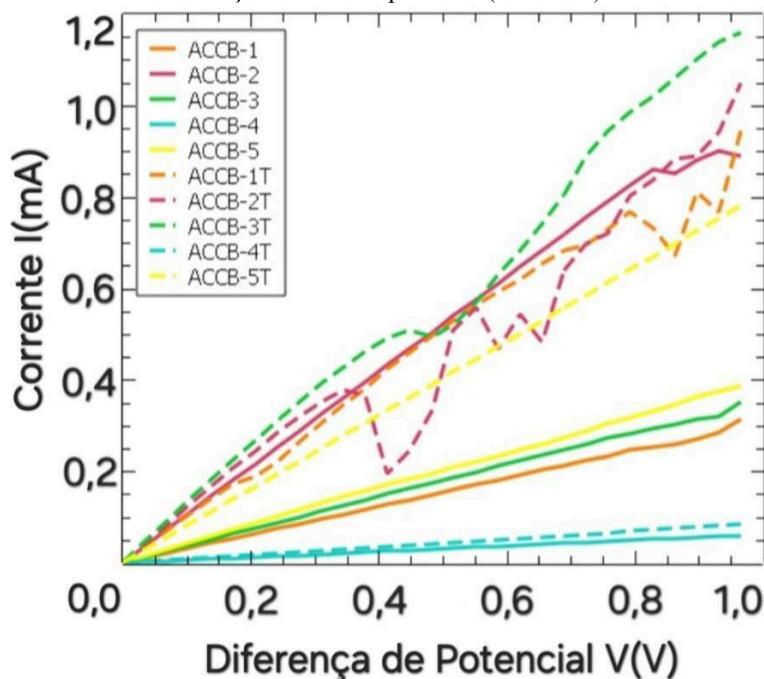
Na formulação PVACBGO quase não se houveram efeitos significativos, a mudança máxima em relação a condutividade (0,81 para 0,83 S/m) ocorreu apenas no substrato vítreo, mas nota-se que houve uma variação não muito significativa. Já para a tinta ACCB em vidro, o tratamento térmico piorou a Resistividade (3,83 para 4,13 Ω.m), confirmando que a instabilidade da matriz é agravada pelo calor.



4.2. Análise de curvas tensão-corrente (IV)

A análise tensão-corrente (curvas IV) iniciou-se com a formulação ACCB, a única testada exclusivamente em substrato de vidro, devido à incompatibilidade do solvente com o plástico. A Figura 12 ilustra o comportamento elétrico das cinco amostras de ACCB, comparando as condições iniciais (ACCB, linhas contínuas) com o pós-tratamento térmico na estufa (ACCB-T, linhas tracejadas).

Figura 12. Gráfico contendo as curvas IV para as cinco amostras de tinta ACCB no substrato vítreo em condições iniciais e pós-cura (ACCB-T).



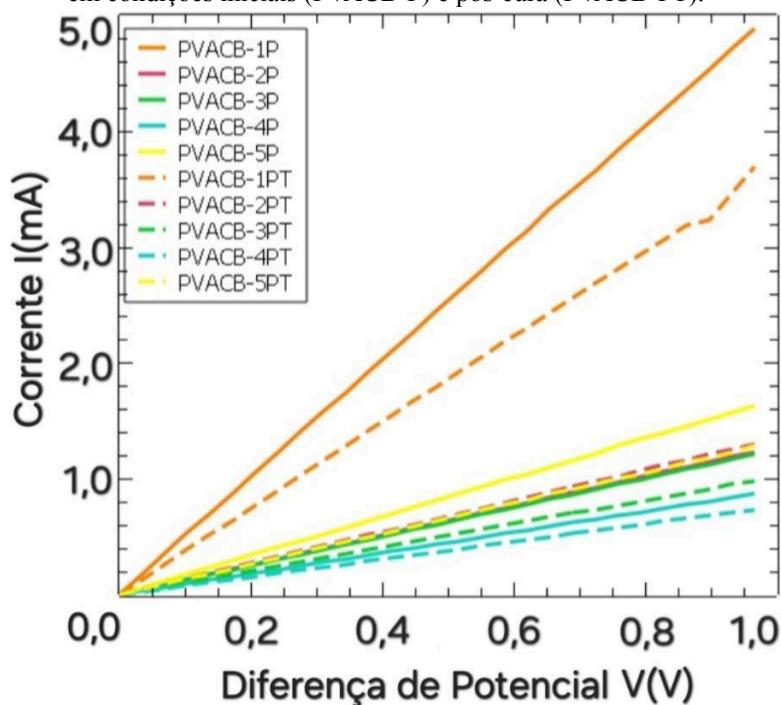
Fonte: Elaboração Própria (2025).

Embora todas as curvas demonstrem uma tendência geral de linearidade que caracteriza um comportamento ôhmico, é notável a presença de ruído nas linhas tracejadas, especialmente após 0,4 V. Este ruído nas curvas IV corrobora com os altíssimos desvios padrão observados na Tabela 7 de resistência média. A inclinação das linhas tracejadas é visivelmente maior que a das linhas contínuas nas amostras 1, 3 e 5, se opondo aos altos valores de resistência obtidos na Tabela 7, o que indica que apesar de sua alta inclinação não temos confiabilidade para dizer que o tratamento foi eficiente, principalmente por conta dos ruídos.



A Figura 13 apresenta o comportamento individual das cinco amostras de tinta PVACB em substrato plástico, comparando a condição inicial (linhas contínuas) com a pós-tratamento térmico (linhas tracejadas).

Figura 13. Gráfico contendo as curvas IV para as cinco amostras de tinta PVACB no substrato plástico em condições iniciais (PVACB-P) e pós-cura (PVACB-PT).



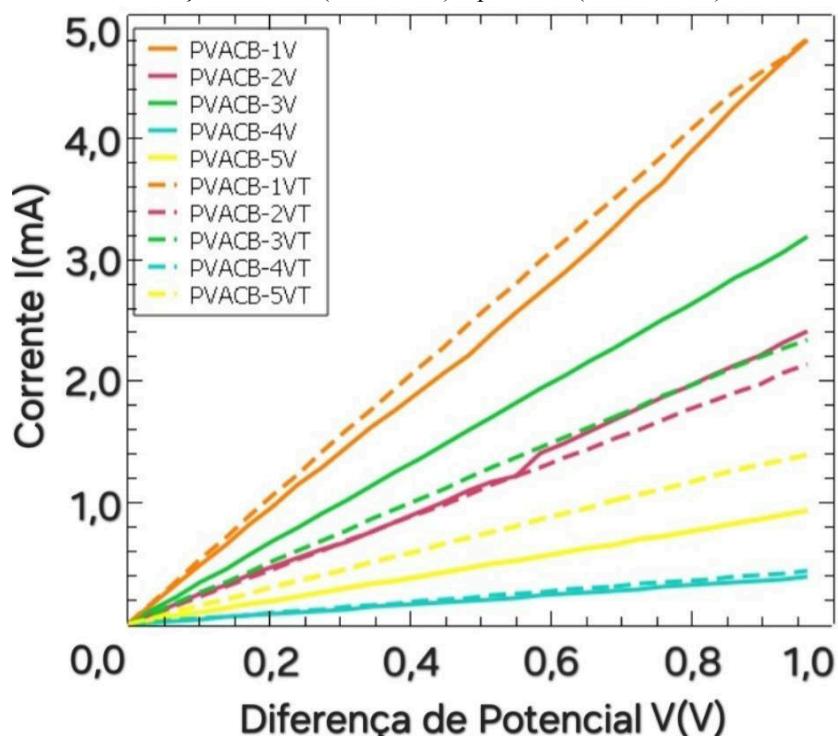
Fonte: Elaboração Própria (2025).

A análise das curvas IV para essa formulação em substrato plástico confirma a excelência desta tinta em termos de condutividade, evidenciada pela elevada e estável inclinação das curvas. No entanto, o gráfico revela um efeito negativo do tratamento térmico, uma vez que ao comparar as amostras uma a uma, as curvas pós-cura se encontram abaixo das curvas originais, exibindo uma inclinação menor. Consequentemente, esse resultado nos diz que o tratamento térmico levou a um aumento de resistência e a uma redução na condutividade funcional dos filmes. É possível afirmar também que a tinta tem uma boa reproduzibilidade, uma vez que os resultados para as amostras 2, 3, 4 e 5 se concentram em uma mesma região do gráfico.



A Figura 14 exibe a mesma análise para as cinco amostras de PVACB, mas agora depositadas em substrato de vidro, permitindo avaliar a influência do substrato e da pós-cura na estabilidade do regime elétrico da tinta.

Figura 14. Gráfico contendo as curvas IV para as cinco amostras de tinta PVACB no substrato vítreo em condições iniciais (PVACB-V) e pós-cura (PVACB-VT).



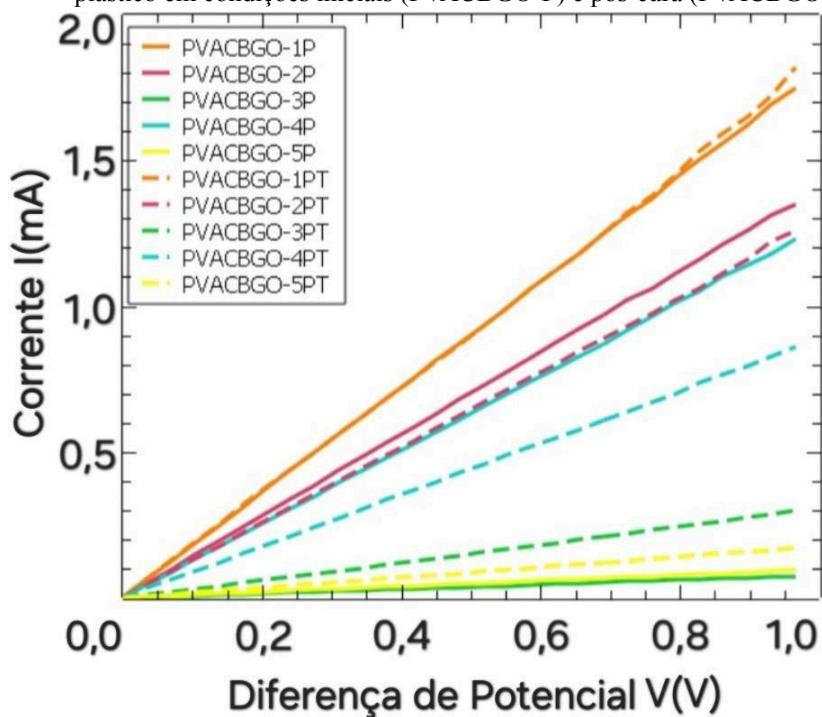
Fonte: Elaboração Própria (2025).

Ao analisar as curvas IV para a formulação PVACB em substrato de vidro confirmamos o regime ôhmico dos filmes e a alta condutividade, evidenciados pelas inclinação das curvas. Ao comparar amostras com e sem tratamento térmico, as linhas tracejadas se encontram rente ou levemente acima das contínuas (exceto para amostra 3), demonstrando que o processo de pós-cura foi eficaz em reduzir a resistência do filme, mas de maneira muito sutil. Em relação à reproduzibilidade podemos afirmar que em substrato vítreo tal tinta não obteve bom desempenho, uma vez que as curvas para cada amostra se encontram bem espaçadas.



A Figura 15 apresenta o comportamento individual das cinco amostras de PVACBGO aplicadas em substrato plástico, comparando as condições com tratamento térmico (PT, linhas tracejadas) e sem tratamento térmico (P, linhas contínuas).

Figura 15. Gráfico contendo as curvas IV para as cinco amostras de tinta PVACBGO no substrato plástico em condições iniciais (PVACBGO-P) e pós-cura (PVACBGO-PT).



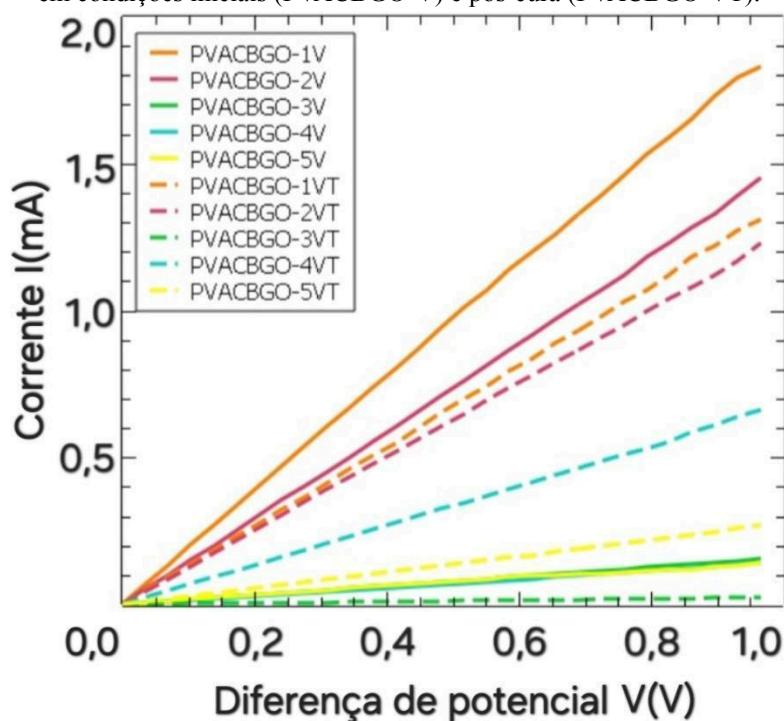
Fonte: Elaboração Própria (2025).

A análise das curvas tensão-corrente para a formulação PVACBGO em substrato plástico revela um comportamento linear. Contudo, a baixa inclinação das curvas (em comparação com as curvas obtidas para PVACB) estão de acordo com os dados de resistência reportados, indicando a menor eficiência condutiva da tinta. É notável o baixo efeito do tratamento térmico uma vez que as curvas das amostras tratadas permanecem praticamente sobrepostas ou ligeiramente abaixo das curvas das amostras não tratadas, no caso das amostras 1, 2 e 4. O espaçamento entre as curvas em geral, definem um comportamento não reproduzível para tinta PVACBGO.



A Figura 16 exibe os resultados correspondentes para as amostras em substrato de vidro em condições com tratamento térmico (VT, linhas tracejadas) e sem tratamento térmico (V, linhas contínuas).

Figura 16. Gráfico contendo as curvas IV para as cinco amostras de tinta PVACBGO no substrato vítreo em condições iniciais (PVACBGO-V) e pós-cura (PVACBGO-VT).



Fonte: Elaboração Própria (2025).

O Comportamento das curvas IV para a formulação PVACBGO aplicada em substrato de vidro confirma o regime ôhmico dos filmes, dada a linearidade das curvas em todo o intervalo de tensão, ainda sim sua inclinação permanece baixa em comparação com a formulação de PVACB em mesmo substrato. No entanto, o gráfico revela desafios de reproduzibilidade e uniformidade da formulação em vidro, o que foi perceptível também nos substratos plásticos, pois as inclinações das cinco amostras variam consideravelmente. É possível observar uma leve tendência de diminuição na inclinação na maioria das amostras após o tratamento térmico, sugerindo que o mesmo foi tão eficiente.



4.3. Discussão sobre a morfologia das formulações

Os resultados da tinta ACCB são o reflexo de uma morfologia descontínua e heterogênea. A resistividade alta, e o desvio padrão elevado em todas as métricas são a principal evidência desse baixo desempenho. O ruído e as flutuações nas curvas IV também confirmam uma rede condutiva instável e de contato pobre. O fato de a acetona possuir uma taxa de evaporação muito alta, combinado com a cura rápida da resina da base de unha, provavelmente fez com que as partículas de carbon black permanecessem estáticas em uma morfologia aglomerada e porosa. Ou seja, o solvente evaporou antes que as partículas tivessem tempo de se reorganizar, resultando em um caminho de percolação incompleto.

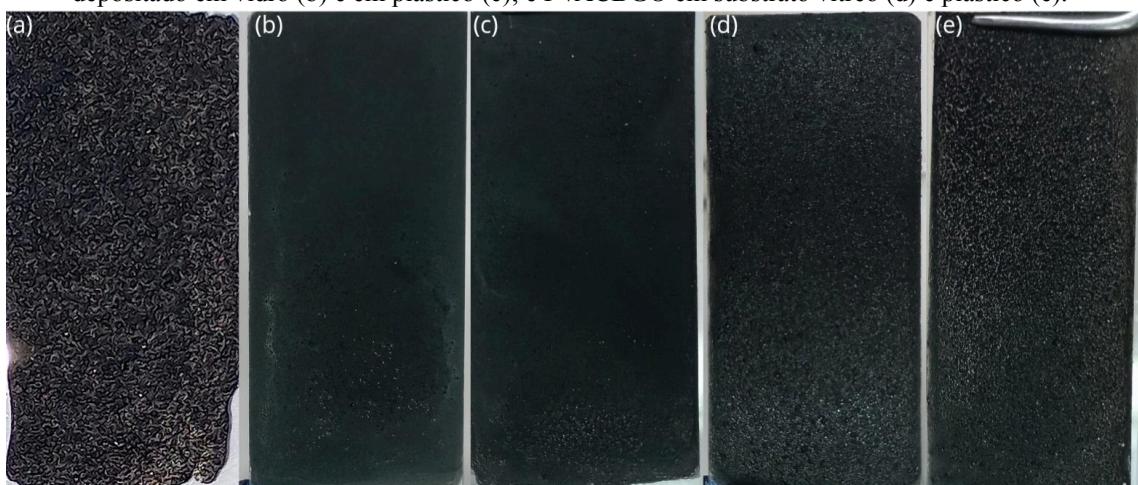
A formulação PVACB demonstra ter a morfologia de percolação mais eficiente e homogênea, o que justifica seu desempenho superior. A condutividade mais alta e os desvios padrão muito baixos atestam a formação de um filme uniforme e estável. A linearidade das curvas IV confirma a homogeneidade da condução. Isso ocorre devido a água possuir uma taxa de evaporação lenta que, combinado com a ação do ligante PVA (álcool polivinílico), permitiu que as partículas de carbon black tivessem tempo para se compactar e se auto organizar de forma eficiente. O resultado é uma rede de percolação densa e contínua, com baixo número de vazios e ótima interconectividade interpartículas. O efeito benéfico do tratamento térmico em substrato vítreo sugere que o calor finalizou a otimização dessa microestrutura.

A performance intermediária da tinta PVACBGO sugere uma morfologia funcional, mas com a introdução de fatores que aumentam a resistência de contato, gerando uma resistividade mais alta do que a de PVACB, resultando em condutividade inferior. A dispersão inicial do óxido de grafeno e a co-dispersão com partículas de carbon black podem ter levado a uma morfologia onde as folhas 2D de GO atuam como espaçadores ou regiões de alta resistência de contato interfacial. O filme resultante, embora coeso, possui barreiras de tunelamento maiores que a rede pura de CB da PVACB, limitando o fluxo de corrente e resultando em um desempenho final não ideal.



A Figura 17 apresenta uma visão macroscópica dos filmes finais para as tintas ACCB em substrato vítreo (a), PVACB depositado em vidro (b) e em plástico (c); e PVACBGO em substrato vítreo (d) e plástico (e), complementando as inferências sobre a morfologia das mesmas, com base no desempenho elétrico de cada uma.

Figura 17. Visão macroscópica dos filmes das formulações ACCB em substrato vítreo (a), PVACB depositado em vidro (b) e em plástico (c); e PVACBGO em substrato vítreo (d) e plástico (e).



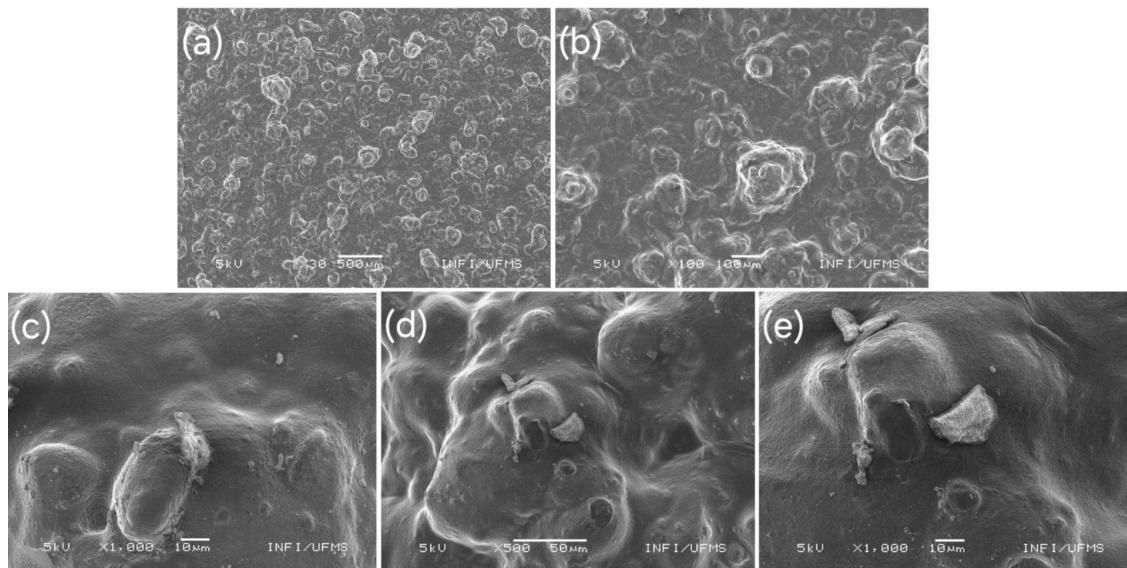
Fonte: Própria autora (2025).

Através da imagem (a), é perceptível que o filme apresenta grandes áreas escuras e aglomeradas separadas por uma rede de espaços mais claros, indicando uma cobertura descontínua e formação de fissuras ou canais. As imagens (b) e (c) exibem filmes de coloração escura intensa e aparência notavelmente uniforme e coesa. Essa consistência visual corrobora o baixo desvio padrão e a alta condutividade da tinta PVACB, indicando a formação de uma morfologia de percolação densa e bem-formada. Em contraste, as amostras (d) e (e) da formulação PVACBGO, embora também escuras, demonstram uma cobertura que parece ser menos homogênea em comparação direta com a de PVACB, o que se alinha perfeitamente à menor condutividade elétrica desta formulação, confirmando a influência das partículas de GO nas alterações ocorridas em nível nanométrico da estrutura da tinta PVACBGO.



A Figura 18 apresenta as micrografias obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do filme da tinta ACCB depositado sobre o substrato de vidro após o tratamento térmico. As imagens das Fig. 18 (a) e 18(b) fornecem uma visão geral em baixa magnificação (30 e 100 x, respectivamente), enquanto as imagens de com magnificação de 500 e 1000 x estão dispostas em, (c), (d) e (e) (escalas de 10 a 50 μm), detalham a morfologia superficial em nível micrométrico.

Figura 18. Imagens feitas por MEV para filme da tinta ACCB depositado sobre o substrato de vidro após o tratamento térmico.



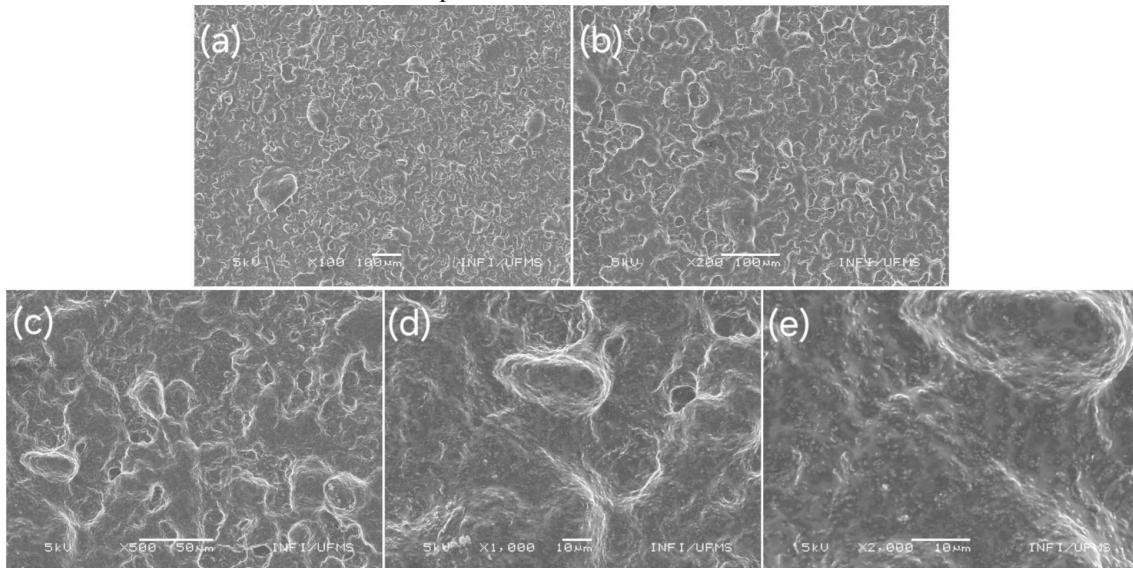
Fonte: Própria autora (2025).

A análise das micrografias da tinta ACCB revela uma morfologia superficial não homogênea e rugosa, caracterizada pela presença de inúmeros aglomerados e inclusões dispersas na matriz do ligante. Em baixa magnificação (a e b), observa-se um filme com textura granulada, sugerindo que o processo de secagem rápida da acetona contribuiu para a formação de microestruturas semelhantes a crateras devido à rápida evaporação do solvente. Nas imagens de maior ampliação (c, d e e), é notável a presença de aglomerados de carbon black incrustados no filme polimérico. Essas irregularidades superficiais, juntamente com a visível formação de agregados e a ausência de um filme plano e denso, indicam uma dispersão e compatibilidade subótimas entre os componentes da tinta, o que pode influenciar negativamente a formação de rotas condutivas contínuas e a condutividade elétrica final do filme.



A Figura 19 exibe as micrografias do filme da formulação PVACB depositado sobre o substrato de vidro com tratamento térmico. As imagens são apresentadas em diferentes magnificações, variando de (a) 100 μm a (e) 10 μm , permitindo a análise da morfologia da superfície desde uma visão geral até o detalhamento micrométrico.

Figura 19. Imagens feitas por MEV para filme da tinta PVACB depositado sobre o substrato de vidro após o tratamento térmico.



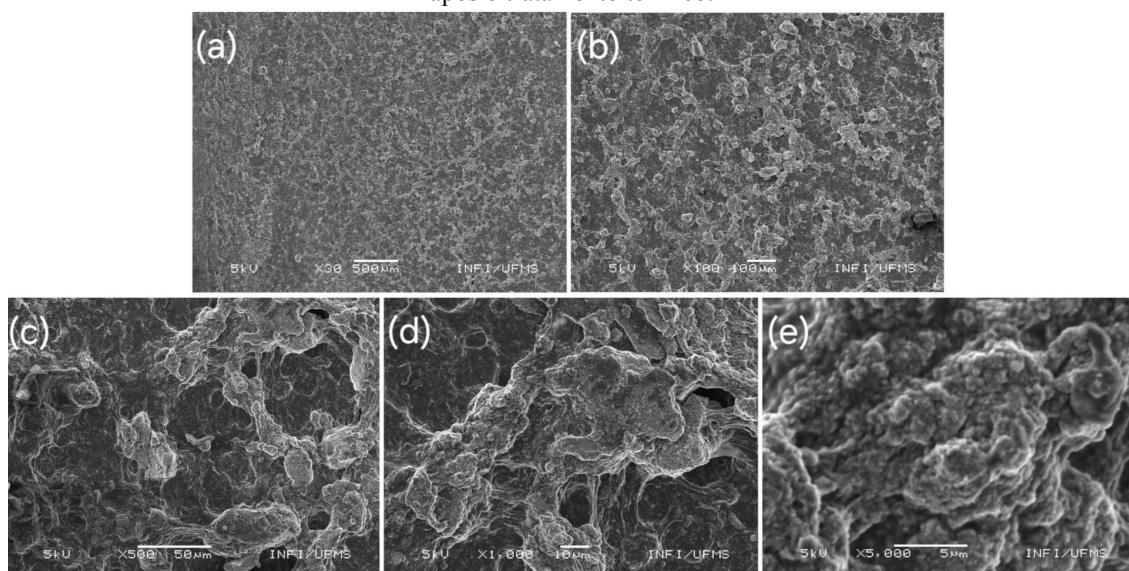
Fonte: Própria autora (2025).

Ao analisar as micrografias da tinta PVACB, observa-se uma superfície que, embora ainda apresente rugosidade, demonstra uma maior coesão e uniformidade em comparação com a amostra ACCB. O filme é caracterizado por uma estrutura em rede, onde o ligante PVA parece envolver de forma mais eficaz o agente condutor carbon black, formando uma matriz mais contínua. Contudo, em todas as ampliações, são visíveis estruturas circulares elevadas, indicando que o processo de secagem da água desionizada foi acompanhado por fenômenos de contração ou de ascensão do solvente, resultando em uma superfície rugosa. A ausência de grandes aglomerados de carbon black soltos e a formação de um filme polimérico mais contínuo sugerem uma melhor dispersão do material condutor nesta matriz aquosa em comparação com a matriz de acetona, o que é um fator positivo para a conectividade da rede condutiva.



A Figura 20 apresenta as micrografias obtidas por MEV do filme da formulação PVACB, desta vez depositado sobre o substrato plástico com tratamento térmico. As imagens são exibidas em magnificações que variam de 500 μm em (a) a 5 μm em (e), permitindo uma inspeção detalhada da morfologia superficial e da interação da tinta com o material polimérico.

Figura 20. Imagens feitas por MEV para filme da tinta PVACB depositado sobre o substrato de plástico após o tratamento térmico.



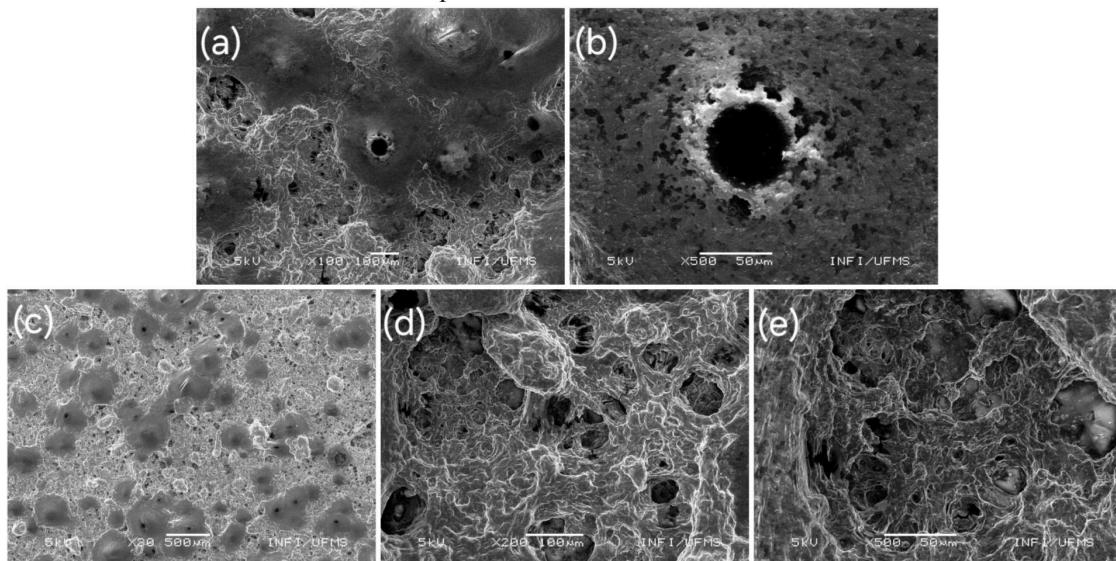
Fonte: Própria autora (2025).

A morfologia do filme PVACB sobre o substrato plástico difere notavelmente da observada no substrato de vidro, exibindo uma estrutura porosa, rugosa e com uma característica rede de fissuras em todas as ampliações. Em baixas magnificações (a e b), percebe-se que a superfície do filme é irregular e fragmentada. Em magnificações mais altas (c, d e e), a estrutura revela grandes cavidades e um emaranhado tridimensional do ligante PVA e do carbon black. Esta morfologia sugere que a secagem sobre o substrato plástico pode ter sido influenciada por uma molhabilidade diferente e uma menor energia superficial do plástico em comparação com o vidro, resultando em uma contração desigual e na formação de uma rede de poros e canais.



A Figura 21 exibe as micrografias obtidas por MEV da formulação PVACBGO depositada sobre o substrato de vidro com tratamento térmico. As imagens variam em magnificações de 500 μm a 50 μm , focando na morfologia superficial do filme que combina dois agentes condutores.

Figura 21. Imagens feitas por MEV para filme da tinta PVACBGO depositado sobre o substrato de vidro após o tratamento térmico.



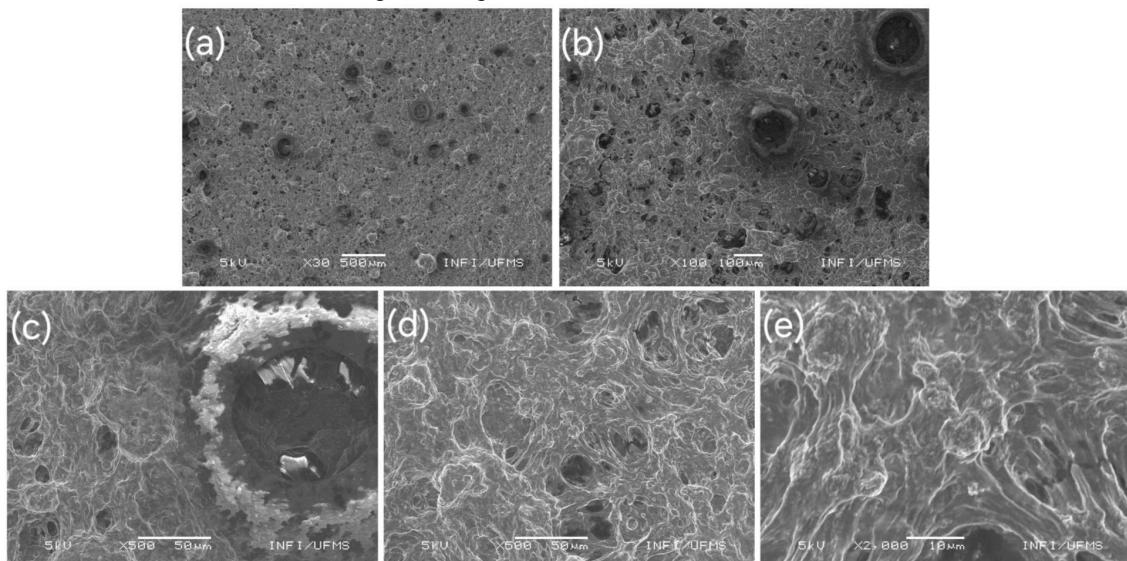
Fonte: Própria autora (2025).

A morfologia do filme PVACBGO no substrato de vidro é caracterizada por uma rugosidade extrema e porosidade acentuada, sendo a superfície a mais irregular observada entre todas as formulações em vidro. Em todas as ampliações, o filme se apresenta com uma estrutura de rede altamente interconectada, mas descontínua, repleta de grandes vazios e orifícios. A imagem (b) destaca um grande buraco central com uma borda irregular, sugerindo um processo de cura em que bolhas de ar ou gotas de solvente causaram a remoção de material ou um colapso localizado. Essa morfologia altamente porosa e descontínua pode ser atribuída à presença do óxido de grafeno, que, mesmo disperso, pode ter alterado a tensão superficial da tinta de forma a promover a formação de bolhas ou a segregação de fases durante a secagem, impactando potencialmente a densidade do filme e a condutividade elétrica.



A Figura 22 ilustra as micrografias do filme da formulação PVACBGO depositada sobre o substrato plástico com tratamento térmico. As imagens, que vão desde uma visão geral em (a) (500 μ m) até a uma magnificação mais alta (e) (10 μ m), fornecem dados cruciais sobre a morfologia de um filme com agentes condutores mistos aplicado a um substrato polimérico.

Figura 22. Imagens feitas por MEV para filme da tinta PVACBGO depositado sobre o substrato de plástico após o tratamento térmico.



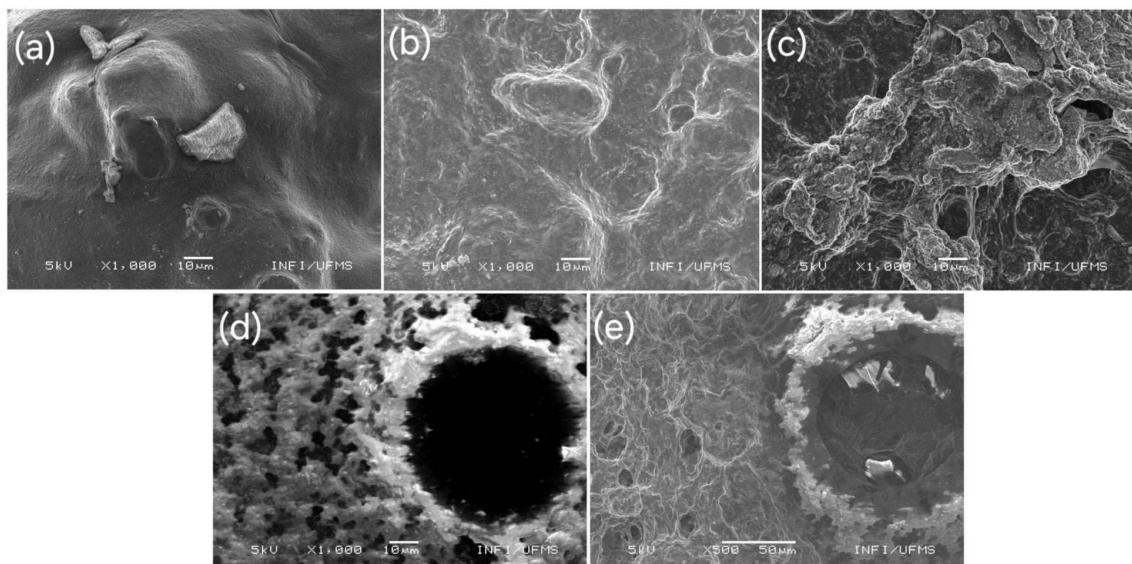
Fonte: Própria autora (2025).

A morfologia do filme PVACBGO sobre o substrato plástico é a mais heterogênea e defeituosa de todas as formulações avaliadas. A superfície exibe uma rugosidade extrema, alta porosidade e múltiplas falhas estruturais em toda a sua extensão. Imagens de baixa (a e b) e alta magnificação (c e e) revelam uma grande concentração de cálices e orifícios de dimensões variadas, sugerindo que o processo de secagem e a baixa energia superficial do plástico resultaram em falhas de cobertura localizadas. A imagem (c) mostra uma grande falha ou cratera de grandes dimensões com bordas levantadas e material rugoso ao redor, possivelmente indicando um colapso estrutural ou a formação de bolhas durante a evaporação do solvente. A coexistência de dois condutores e as interações na interface tinta/plástico resultaram em uma morfologia descontínua e altamente fragmentada, o que é um fator crítico para a condutividade e a estabilidade mecânica do filme.



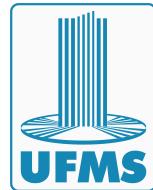
A Figura 23 apresenta uma coletânea de micrografias obtidas por MEV, resumindo as morfologias superficiais dos filmes de tinta condutiva em alta ampliação sendo: (a) ACCB em vidro, (b) PVACB em vidro, (c) PVACB em plástico, (d) PVACBGO em vidro, e (e) PVACBGO em plástico, todos após tratamento térmico.

Figura 23. Imagens feitas por MEV para filmes das tintas (a) ACCB em vidro, (b) PVACB em vidro, (c) PVACB em plástico, (d) PVACBGO em vidro, e (e) PVACBGO em plástico, todos após tratamento térmico.



Fonte: Própria autora (2025).

A análise comparativa revela que a morfologia dos filmes é fortemente influenciada pela combinação solvente-ligante e pela natureza do substrato. A tinta ACCB (a) em vidro se destaca pela presença de grandes aglomerados. Em contraste, a tinta PVACB (b) em vidro resulta em um filme mais coeso e uniforme, embora apresente rugosidade moderada e algumas microestruturas circulares. Ao migrar para o substrato plástico, a PVACB (c) exibe uma rugosidade acentuada e uma estrutura porosa, sugerindo maior contração do filme. As formulações contendo óxido de grafeno PVACBGO, tanto no vidro (d) quanto no plástico (e), apresentaram as morfologias mais descontínuas e defeituosas. As imagens (d) e (e) são marcadas por grandes falhas, orifícios e crateras de grandes dimensões, indicando que a incorporação do GO, influenciou de forma significativa na formação do filme, mostrando uma dependência



quando a forma de secagem, fator crítico a ser correlacionado com os resultados de condutividade.

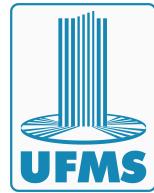
5. CONCLUSÃO

O presente trabalho investigou e caracterizou o desempenho elétrico de três formulações de tintas condutivas à base de carbon black utilizando diferentes ligantes e solventes, com foco na aplicabilidade em eletrônica flexível de baixo custo. Os resultados validaram a hipótese central de que o desempenho elétrico é criticamente dependente da escolha do sistema solvente/ligante e do processo de pós-cura.

A tinta à base de acetona e base de unha (ACCB) demonstrou ser a menos viável, com a resistividade (ρ) mais alta ($4,13 \Omega \cdot m$) e a condutividade (σ) mais baixa ($0,30 \text{ S/m}$). O alto desvio padrão e o ruído nas curvas IV confirmaram a formação de uma morfologia descontínua, inviabilizada pela rápida evaporação do solvente. A inclusão do óxido de grafeno (PVACBGO) resultou em desempenho intermediário, com condutividade inferior à da PVACB ($\sigma \approx 0,67 \text{ a } 0,83 \text{ S/m}$). Os dados sugerem que o GO atuou como uma barreira interfacial, prejudicando a otimização da rede de percolação. A formulação aquosa à base de PVA e carbon black (PVACB) provou ser a mais eficaz, atingindo a maior condutividade ($\sigma_{\text{máx}} \text{ de } 1,67 \text{ S/m}$) e a melhor uniformidade, atestada pelas curvas IV de excelente linearidade e alta amplitude.

Os resultados destacam que o processo de pós-cura deve ser específico para cada substrato: o tratamento térmico a 100°C foi benéfico para o substrato de vidro, reduzindo a resistividade da tinta PVACB (0,73 para $0,62 \Omega \cdot m$) e otimizando a condutividade, o que indica compactação morfológica. Em compensação, esse processo de pós cura foi prejudicial para a formulação em substrato plástico, levando a uma redução na condutividade (1,04 para $0,97 \text{ S/m}$), sugerindo retração da matriz.

Em conclusão, a tinta PVACB-VT (vidro tratado) demonstrou ser a formulação de maior desempenho, apresentando uma condutividade 101,2% superior à melhor tinta híbrida (PVACBGO) e 456,7% superior à tinta menos eficiente (ACCB). Logo o sistema PVA/Água/CB é o caminho ideal para o desenvolvimento de tintas condutivas eficientes e estáveis.



Os resultados obtidos demonstram que a formulação otimizada PVACB-VT se estabeleceu como a solução mais promissora do estudo, alcançando uma condutividade máxima ($\sigma_{máx}$) de 1,67 S/m. Embora este valor seja significativamente superior ao desempenho das formulações com acetona e óxido de grafeno, ele ainda se encontra em um patamar inferior quando comparado às tintas condutoras comerciais de alto desempenho.

Tintas comerciais de carbon black de grau eletrônico ou à base de grafeno/nanotubos de carbono frequentemente atingem condutividades na faixa de 10^3 a 10^5 S/m, dependendo da concentração, do veículo e da técnica de aplicação. Contudo, é fundamental ressaltar que o sistema PVA/Água/CB oferece um caminho de desenvolvimento ideal devido ao seu baixo custo, sustentabilidade (base aquosa) e simplicidade de processamento. A condutividade de 1,67 S/m valida o conceito de uma tinta eficaz para aplicações de baixa tensão e prototipagem de baixo custo, e sugere que a otimização da concentração de carbon black e o ajuste fino do processo de pós-cura têm o potencial de elevar o desempenho para patamares mais competitivos no mercado de eletrônica impressa flexível de baixo custo.



6. REFERÊNCIAS

ALARIFI, I. M. Investigation the conductivity of carbon fiber composites focusing on measurement techniques under dynamic and static loads. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 8, n. 5, p. 4863–4893, 1 set. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785419309950>. Acesso em: 09 nov. 2025.

COLEMAN, J. N. Small but strong: A review of the mecânicas properties of carbon nanotube-polymer composites , v. 18, n. 3, p. 359-363, 2006. Disponível em:<https://pt.scribd.com/document/352970196/coleman2006-> . Acesso em: 09 nov. 2025.

DOS SANTOS, B. R.; SILVA, L. G. Tinta condutora de baixo custo à base de pó de grafite. *Revista Científic@ Universitas*, v. 5, n. 2, p. 109–115, jul./dez. 2018. Disponível em: <http://revista.fepi.br/revista/index.php/revista/article/view/591>. Acesso em: 09 nov. 2025.

FERNANDES, I. J. et al. Silver nanoparticle conductive inks: synthesis, characterization, and fabrication of inkjet-printed flexible electrodes. *Scientific Reports*, v. 10, n. 1, 1 jun. 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/341803146_Silver_nanoparticle_conductive_inks_synthesis_characterization_and_fabrication_of_inkjet-printed_flexible_electrodes. Acesso em: 09 nov. 2025.

HOWARD, I. A.; ABZIEHER, T.; HOSSAIN, I. M.; EGGERS, H.; SCHACKMAR, F.; TERNES, S.; RICHARDS, B. S.; LEMMER, U.; PAETZOLD, U. W. Perovskitas revestidas e impressas para aplicações fotovoltaicas. *Advanced Materials*, v. 31, n. 26, 1806702, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/adma.201806702>. Acesso em: 09 nov. 2025.

JUNQUEIRA, V. Percolação e caracterização elétrica em tintas condutoras. 2012. 83 f. Dissertação (Mestrado em Materiais para Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Materiais para Engenharia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012. Disponível em: https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/bitstream/123456789/1171/1/dissertacao_junqueir_a1_2012.pdf. Acesso em: 09 nov. 2025.

KNOPF, G. K. et al. Flexible electrical circuits printed on polymers using graphene-cellulose inks. *IEEE Proceedings, Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC)*, p. 854–857, jul. 2016. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7527375>. Acesso em: 09 nov. 2025.



NAIK, N. et al. Biopolymer-based carbon conductive inks for printed electronics: a comprehensive review. *Polymer Bulletin*, 28 jul. 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00289-025-05947-5>. Acesso em: 09 nov. 2025.

OKA, M. M. Medida de Quatro Pontas. Versão 1.0, 2000. Disponível em: <https://www.scribd.com/document/349027269/Quatro-PontAs>. Acesso em: 09 nov. 2025.

OLIVEIRA, V. C. Desenvolvimento de tintas condutoras à base de carbono para a fabricação de dispositivos eletroquímicos. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química) — Universidade Federal de Uberlândia, Ituiutaba, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/36064>. Acesso em: 09 nov. 2025.

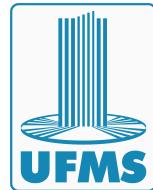
PAJOR-ŚWIERZY, A.; PAWŁOWSKI, R.; WARSZYŃSKI, P.; SZCZEPANOWICZ, K. P. The conductive properties of ink coating based on Ni–Ag core–shell nanoparticles with the bimodal size distribution. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, v. 31, n. 9, ago. 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/342700556_The_conductive_properties_of_ink_coating_based_on_Ni-Ag_core-shell_nanoparticles_with_the_bimodal_size_distribution. Acesso em: 09 nov. 2025.

PAULA, L. F. de. Desenvolvimento de tintas condutivas e sua aplicação em eletrodos impressos. 2013. 178 f. Tese (Doutorado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/17517..> Acesso em: 09 nov. 2025.

QIN, Y. et al. A review of carbon-based conductive inks and their printing technologies for integrated circuits. *Coatings*, v. 13, n. 10, art. 1769, 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/374711818_A_Review_of_Carbon-Based_Conductive_Inks_and_Their_Painting_Technologies_for_Integrated_Circuits. Acesso em: 09 nov. 2025.

QIN, Yufeng; OUYANG, Xueqiong; LV, Yang; LIU, Wencai; LIU, Qing; WANG, Shuangxi. A Review of Carbon-Based Conductive Inks and Their Printing Technologies for Integrated Circuits. *Coatings*, v. 13, n. 10, p. 1769, 2023. MDPI AG. Disponível em: <https://ouci.dntb.gov.ua/en/works/loAp1pV7/>. Acesso em: 09 nov. 2025.

REENAERS, D. et al. Layer morphology and ink compatibility of silver nanoparticle inkjet inks for near-infrared sintering. *Nanomaterials*, v. 10, n. 5, p. 892, 7 maio 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-4991/10/5/892>. Acesso em: 09 nov. 2025.



SANCHEZ-DUENAS, Leire; GOMEZ, Estibaliz; LARRAÑAGA, Mikel; BLANCO, Miren. A Review on Sustainable Inks for Printed Electronics: Materials for Conductive, Dielectric and Piezoelectric Sustainable Inks. *Materials*, v. 16, n. 11, p. 3940, maio 2023. MDPI. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/371064054_A_Review_on_Sustainable_Inks_for_Printed_Electronics_Materials_for_Conductive_Dielectric_and_Piezoelectric_Sustainable_Inks. Acesso em: 09 nov. 2025.

SANTOS, G. J. B. Nova proposta de tinta condutiva de baixo custo, para aplicação em placas de circuito impresso. 2018. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia eletrônica e de telecomunicações) – Universidade Federal de Uberlândia, Patos de Minas, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/21910>. Acesso em: 09 nov. 2025.

SECOR, E. B. et al. Inkjet Printing of Graphene for Flexible Electronics. *Advanced Materials*, v. 25, n. 38, p. 5745-5749, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/263962547_Inkjet_Printing_of_High_Conductivity_Flexible_Graphene_Patterns. Acesso em: 09 nov. 2025.

SOUSA, Talita; PIRES, Wellington Mattos; PAULA, Andersan dos Santos; BRANDÃO, Luiz Paulo; et al. Desenvolvimento de um sistema de medição da condutividade elétrica pelo método de quatro pontas. In: *76º Congresso Anual da ABM – Internacional*, ago. 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/373664716_DESENVOLVIMENTO_DE_UM_SISTEMA_DE_MEDICAO_DA_CONDUTIVIDADE_ELETTRICA_PELO_METODO_DE_QUATRO_PONTAS. Acesso em: 09 nov. 2025.

WIKLUND, J. et al. A Review on Recyclable Printed Electronics: Fabrication Methods, Inks, Substrates, Applications and Environmental Impacts. 1 jun. 2021. Disponível em: <https://www.preprints.org/manuscript/202106.0017/v1>. Acesso em: 09 nov. 2025.

ZAVANELLI, N.; YEO, W.-H. Advances in Screen Printing of Conductive Nanomaterials for Stretchable Electronics. *ACS Omega*, v. 6, n. 14, p. 9344–9351, 31 mar. 2021. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.1c00638>. Acesso em: 09 nov. 2025.

ZHANG, Weipeng; YANG, Jun; KNOPF, George K. Morphology of silver particles and films arising from particle-free silver ink droplet evaporation. *Advanced Materials Interfaces*, v. 11, n. 1, 2024. Weinheim: John Wiley & Sons, Inc. Disponível em: <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002%2Fadmi.202300448>. Acesso em: 09 nov. 2025.



7. ANEXOS

Tabela 7. Valores de Resistência Média em Ω para as amostras correspondentes as tintas ACCB, PVACB e PVACBGO de vidro antes (-V) e após tratamento térmico (-VT).

Amostra	Resistência Média (Ω)					
	ACCB-V	ACCB-VT	PVACB -V	PVACB -VT	PVACBGO -V	PVACBGO -VT
1	146,5	147,55	40,23	37,34	58,79	76,5
2	223,8	254,95	54,23	51,01	75,48	89,67
3	237,02	252,9	45,51	44,69	192,32	171,37
4	649,8	558,7	56,49	49,08	117,3	78,5
5	267,03	427,53	94,84	62,95	145,4	108,87
Média	274,99	328,33	58,26	49,01	117,86	104,98
Desvio Padrão	197,91	163,3	21,48	9,4	53,82	39,27

Fonte: Elaboração Própria (2025).

Tabela 8. Valores de Resistência Média em Ω para as amostras correspondentes as tintas PVACB E PVACBGO de plástico antes (-P) e após tratamento térmico (-PT).

Amostra	Resistência Média (Ω)			
	PVACB-P	PVACB-PT	PVACBGO-P	PVACBGO-PT
1	36,1	48,51	90,32	82,34
2	103,25	80,03	188,57	161,63
3	85,3	94,49	102,19	107,92
4	159,13	141,25	101,72	118,08
5	98,06	96,66	167,18	179,38
Média	96,37	92,19	130	129,87
Desvio Padrão	44	33,5	44,61	39,81

Fonte: Elaboração Própria (2025).



Tabela 9. Valores de Resistência de Folha Média em Ω/sq para as amostras correspondentes as tintas ACCB, PVACB e PVACBGO de vidro antes (-V) e após tratamento térmico (-VT).

Amostra	Resistência de Folha Média (Ω/sq)					
	ACCB-V	ACCB-VT	PVACB -V	PVACB -VT	PVACBGO -V	PVACBGO -VT
1	67,82	68,31	18,63	17,29	27,22	35,42
2	103,61	118,03	25,11	23,62	34,94	41,51
3	109,73	117,08	21,07	20,69	89,04	79,34
4	300,83	258,66	26,15	22,72	54,31	36,34
5	123,63	197,93	43,91	29,14	67,31	50,4
Média	109,73	118,03	25,11	22,72	54,31	41,51
Desvio Padrão	91,62	75,6	9,94	4,35	24,92	18,18

Fonte: Elaboração Própria (2025).

Tabela 10. Valores de Resistência de Folha Média em Ω/sq para as amostras correspondentes as tintas PVACB E PVACBGO de plástico antes (-P) e após tratamento térmico (-PT).

Amostra	Resistência de Folha Média (Ω/sq)			
	PVACB-P	PVACB-PT	PVACBGO-P	PVACBGO-PT
1	16,71	22,46	41,81	38,12
2	47,8	37,05	87,3	74,83
3	39,49	43,75	47,31	49,96
4	73,67	65,39	47,09	54,67
5	45,4	44,75	77,4	83,05
Média	45,4	43,75	47,31	54,67
Desvio Padrão	20,37	15,51	20,65	18,43

Fonte: Elaboração Própria (2025).



Tabela 11. Valores de Resistividade Média em $\Omega \cdot m$ para as amostras correspondentes as tintas ACCB, PVACB e PVACBGO de vidro antes (-V) e após tratamento térmico (-VT).

Amostra	Resistividade Média ($\Omega \cdot m$)					
	ACCB-V	ACCB-VT	PVACB -V	PVACB -VT	PVACBGO -V	PVACBGO -VT
1	1,84	1,85	0,51	0,47	0,74	0,96
2	2,81	3,2	0,68	0,64	0,95	1,13
3	2,98	3,18	0,57	0,56	2,42	2,15
4	8,17	7,02	0,71	0,62	1,47	0,99
5	3,36	5,37	1,19	0,79	1,83	1,37
Média	3,83	4,13	0,73	0,62	1,48	1,32
Desvio Padrão	2,49	2,05	0,27	0,12	0,68	0,49

Fonte: Elaboração Própria (2025).

Tabela 12. Valores de Resistividade Média em $\Omega \cdot m$ para as amostras correspondentes as tintas PVACB E PVACBGO de plástico antes (-P) e após tratamento térmico (-PT).

Amostra	Resistividade Média ($\Omega \cdot m$)			
	PVACB-P	PVACB-PT	PVACBGO-P	PVACBGO-PT
1	0,45	0,61	1,13	1,03
2	1,3	1,01	2,37	2,03
3	1,07	1,19	1,28	1,36
4	2	1,77	1,28	1,48
5	1,23	1,21	2,1	2,25
Média	1,21	1,16	1,63	1,63
Desvio Padrão	0,55	0,42	0,56	0,5

Fonte: Elaboração Própria (2025).



Tabela 13. Valores de Condutividade Média em S/m para as amostras correspondentes as tintas ACCB, PVACB e PVACBGO de vidro antes (-V) e após tratamento térmico (-VT).

Amostra	Condutividade Média (S/m)					
	ACCB-V	ACCB-VT	PVACB -V	PVACB -VT	PVACBGO -V	PVACBGO -VT
1	0,54	0,54	1,98	2,13	1,35	1,04
2	0,36	0,31	1,47	1,56	1,05	0,89
3	0,34	0,32	1,75	1,78	0,41	0,46
4	0,12	0,14	1,41	1,62	0,68	1,01
5	0,30	0,19	0,84	1,26	0,55	0,73
Média	0,33	0,30	1,49	1,67	0,81	0,83
Desvio Padrão	0,15	0,15	0,43	0,32	0,39	0,24

Fonte: Elaboração Própria (2025).

Tabela 14. Valores de Condutividade Média em S/m para as amostras correspondentes as tintas PVACB E PVACBGO de plástico antes (-P) e após tratamento térmico (-PT).

Amostra	Condutividade Média (S/m)			
	PVACB-P	PVACB-PT	PVACBGO-P	PVACBGO-PT
1	2,20	1,64	0,88	0,97
2	0,77	0,99	0,42	0,49
3	0,93	0,84	0,78	0,74
4	0,50	0,56	0,78	0,67
5	0,81	0,82	0,48	0,44
Média	1,04	0,97	0,67	0,66
Desvio Padrão	0,67	0,40	0,21	0,21

Fonte: Elaboração Própria (2025).