

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS**  
**Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação**  
**Centro de Desenvolvimento Tecnológico**  
**Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais**



**Tese de Doutorado**

**Desenvolvimento de nanocompósitos poliméricos visando aplicação como  
revestimento térmico e bactericida para construção civil**

**Fernanda Vieira Barasuol**

Pelotas, 2025

**Fernanda Vieira Barasuol**

**Desenvolvimento de nanocompósitos poliméricos visando aplicação como  
revestimento térmico e bactericida para construção civil**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Machado Machado

Coorientadora: Profa. Dra. Carolina Ferreira de Matos Jauris

Pelotas, 2025

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas  
Catalogação da Publicação

B223d Barasuol, Fernanda Vieira

Desenvolvimento de nanocompósitos poliméricos visando aplicação como revestimento térmico e bactericida para construção civil [recurso eletrônico] / Fernanda Vieira Barasuol ; Fernando Machado Machado, orientador ; Carolina Ferreira de Matos Jauris, coorientadora. — Pelotas, 2025.

145 f. : il.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2025.

1. Nanocompósito. 2. Nanopartículas de prata. 3. Óxido de grafeno. 4. Eficiência térmica. 5. Atividade antibacteriana. I. Machado, Fernando Machado, orient. II. Jauris, Carolina Ferreira de Matos, coorient. III. Título.

CDD 620.11063

Fernanda Vieira Barasuol

Desenvolvimento de nanocompósitos poliméricos visando aplicação como  
revestimento térmico e bactericida para construção civil

Tese aprovada, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 26/09/2025

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Fernando Machado Machado (Orientador)  
Doutor em Engenharia, área de concentração Ciência e Tecnologia dos Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Profa. Dra. Carolina Ferreira de Matos Jauris (Coorientadora)  
Doutora em Química pela Universidade Federal do Paraná

---

Profa. Dra. Alice Gonçalves Osório  
Doutora em Engenharia, área de concentração Ciência e Tecnologia dos Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Profa. Dra. Annelise Kopp Alves  
Doutora em Engenharia, área de concentração Ciência e Tecnologia dos Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Prof. Dr. Sergio Roberto Mortari  
Doutor em Química pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

---

Profa. Dra. Daiani Canabarro Leite (Suplente)  
Doutora em Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Profa. Dra. Cristiane Ferraz de Azevedo (Suplente)  
Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Pelotas

**Dedico este trabalho aos meus alunos, que me ensinam tanto (ou mais) quanto aprendem. Cada pergunta e cada desafio compartilhados são parte do que me faz seguir acreditando na educação como caminho de transformação. Esta pesquisa é para vocês, que tornam o ensinar uma jornada viva e significativa.**

## **Agradecimentos**

À Deus.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando Machado Machado, e à minha coorientadora, Profa. Dra. Carolina Ferreira de Matos Jauris, expresso minha profunda gratidão pelas orientações firmes, generosas e sempre atentas ao longo desta jornada. A dedicação, paciência e conhecimento foram fundamentais para a construção deste trabalho e para meu crescimento como pesquisadora. Exemplos de ética, docência e humanidade que levarei comigo para a vida toda.

Ao Nicholas Fernandes de Souza, meu grande parceiro de pesquisa e experimentos, agradeço pela colaboração dedicada, pelas trocas enriquecedoras e pelo apoio constante ao longo deste trabalho. À equipe de docentes do Laboratório de Pesquisa em Materiais – Prof. Dr. Rubens Camaratta, Prof. Dr. Thiago Volkmer e Profa. Dra. Alice Osório pelas valiosas contribuições durante este período, aos acadêmicos Laura e Franchescole pelo auxílio nas medidas mecânicas, Leandro, Julia, Felipe, Otávio e Marcelle pelo apoio nas sínteses, Cris pela incansável contribuição com o seu conhecimento na área e aos demais colegas do grupo que tanto auxiliaram nos experimentos das idas e vindas ao laboratório. Este grupo é muito especial para mim; A todos os professores do Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – doutorado, pela importante contribuição com o conhecimento na área de materiais;

Ao meu querido grupo– GQ-Mate Unipampa e UFSM, que tanto contribuíram desde a época do mestrado. Um agradecimento especial à Mayara Leão e à Gabriele Züge, que em outros desafios na vida ainda seguem sempre dispostas a ajudar.

À Unipampa Campus Bagé e Caçapava do Sul. À Profa. Dra. Caroline Moraes e ao Luciano, pela disponibilidade do laboratório e auxílio na interpretação e desenvolvimento dos primeiros ensaios microbiológicos;

Ao grupo de Química de Materiais da Universidade Federal do Paraná (GQM – UFPR), pelo auxílio em imagens de AFM;

Ao CEME-SUL – Centro de Microscopia Eletrônica do Sul – FURG, pela disponibilidade para realização das imagens de MEV;

À Resicryl pela disponibilidade da emulsão acrílica para este trabalho;

Ao Prof. Dr. Roberto Christ Vianna Santos, da UFSM, pela realização das análises microbiológicas tão importantes para este estudo;

À Profa. Dra. Daiani Canabarro Leite – Departamento de Física da UFSM, pela realização dos ensaios em DLS das amostras das nanopartículas de prata;

Aos meus colegas de doutorado em materiais, Adalberto e Daniele, companhia e abrigo importante nesta jornada;

À URCAMP, minha “segunda casa” – à gestão pelo incentivo, aos meus colegas dos cursos de Arquitetura e Urbanismo, Engenharia Civil e Engenharia de Produção, pelo apoio constante. Ao Sr. Juarez, técnico do laboratório de materiais da URCAMP, por toda dedicação em aula e auxílio no desenvolvimento dos protótipos para as análises térmicas; Ao Prof. Rubens Lunelli, pelos conhecimentos compartilhados na Física;

Ao Eng. Civil Jeronimo Bazerque, pela disponibilidade da câmera termográfica para a realização dos ensaios necessários;

À UFRGS pela disponibilidade do laboratório para os primeiros estudos de condutividade térmica nas amostras;

À CAPES, ao CNPQ, ao INCT Nanocarbono, ao INCT Nanovida e à FAPERGS pelo apoio financeiro;

Aos membros da banca de qualificação e banca de defesa, Prof. Dr. Eduardo Grala, Prof. Dr. Sérgio Mortari, Profa. Dra. Alice Osório, Profa. Dra Annelise Alves, Profa. Dra. Daiane Leite e Profa. Dra Cristiane Azevedo pela disponibilidade em contribuir para a avaliação deste trabalho;

Às meninas da StudioLuz Bagé – Caroline Ferreira e Isabella Garcia, por cuidarem tão bem da loja durante o tempo ausente;

Aos queridos Tio Mozart, Miria e família, Tia Núria, Tana, que gentilmente me hospedaram em suas casas durante as atividades do doutorado;

Aos meus alunos da URCAMP dos cursos de Arquitetura e Urbanismo, Engenharia Civil e Engenharia de Produção, que são a motivação para todo este trabalho;

À minha família toda – em especial Aloisio, Manuela e Amanda, base forte da minha vida, apoio, amor incondicional e incentivo em todos os momentos. Meus irmãos, laço forte e eterno que motiva a seguir em frente; à minha mãe Zizi, meu maior exemplo de ser humano, amor e dedicação. Esse resultado só existe pois tu estás comigo sempre;

Ao meu amado pai Antônio (*in memorian*), meu eterno agradecimento por todo amor, cuidado e tudo que ainda representa na minha vida.

## Resumo

BARASUOL, Fernanda Vieira. **Desenvolvimento de nanocompósitos poliméricos visando aplicação como revestimento térmico e bactericida para construção civil.** Orientador: Fernando Machado Machado. Coorientadora: Carolina Ferreira de Matos Jauris. 2025. 145f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – PPGCEM, Universidade Federal de Pelotas, 2025.

A otimização do desempenho térmico das edificações, juntamente com a promoção de ambientes internos mais salubres, constitui uma demanda contínua no setor da construção civil. Nesse contexto, torna-se imprescindível a pesquisa e aplicação de materiais que potencializem a eficiência energética e ambiental das edificações. Os materiais em escala nanométrica, chamados nanomateriais, apresentam propriedades interessantes que, quando aplicados em pequenas quantidades na produção de materiais nanocompósitos, podem melhorar ou desenvolver novas propriedades. Alguns exemplos são o óxido de grafeno (GO) e as nanopartículas de prata (AgNPs), nanomateriais que apresentam propriedades antibacterianas, resistência mecânica, estabilidade térmica, entre outras. Visando contribuir para a melhoria do conforto térmico aliado à limpeza e higienização dos ambientes de permanência prolongada, essa pesquisa visa o desenvolvimento de materiais híbridos de AgNPs e GO incorporados em matrizes poliméricas para aplicação como revestimento (pintura) na construção civil. Na primeira etapa da pesquisa, foram sintetizados o GO e as AgNPs, e otimizada a condição experimental para desenvolvimento dos nanocompósitos pela tecnologia do látex. Foram definidas as proporções das nanoestruturas, assim como a concentração da solução de AgNPs, e testes de substrato. Os materiais precursores foram caracterizados por UV-vis e microscopia de força atômica (AFM), o GO por titulação potenciométrica e análise termogravimétrica (TGA), e as AgNPs por difração de raios x (DRX). Os filmes foram caracterizados morfológicamente por AFM e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Ainda, foram realizadas análises estruturais como espectroscopia no infravermelho, Raman, análises mecânicas e térmicas por termografia no infravermelho. Para a obtenção da atividade antibacteriana foi realizada a análise microbiológica conforme o método descrito no protocolo M02 do CLSI, com modificações. Os resultados mostram que a síntese dos materiais precursores está de acordo com a literatura, mostrando os picos característicos do GO e das AgNPs. Os resultados de DRX das AgNPs mostram que houve a redução de íons prata para prata metálica em nanopartículas; os resultados de MEV apresentam a boa homogeneidade dos nanocompósitos, sem estruturas soltas e com as nanopartículas bem aderidas à matriz polimérica. Nas imagens de AFM pode-se observar que a presença do CTAB auxilia no processo de coalescimento das partículas de látex, assim como a rugosidade das amostras aumenta à medida que a concentração dos reforços também aumenta. Ainda, as amostras dos nanocompósitos apresentaram dureza menor que a matriz pura, assim como uma maior adesividade. A espectroscopia FTIR mostrou que a incorporação das nanoestruturas não altera a estrutura da matriz. Nas análises mecânicas em tensão-deformação, a presença isolada dos reforços na matriz, assim como a maioria dos nanocompósitos, aumenta o módulo de Young, porém a amostra com os dois componentes em proporções intermediárias – 1AgNP1GO – apresentou maior flexibilidade e alongamento do material. As análises microbiológicas não apontaram atividades antimicrobianas e

antifúngicas dos nanocompósitos, podendo ser um indicativo do agregamento das partículas, concentração ou isolamento pela matriz. Nas análises termográficas pode-se observar que o nanocompósito 2AgNP2GO apresentou uma diferença de temperatura superficial de até -4°C comparado às demais amostras, provando ser uma alternativa para utilização como revestimentos que auxiliem no desempenho térmico de edificações.

Palavras-chave: nanocompósito; nanopartículas de prata; óxido de grafeno; eficiência térmica; atividade antibacteriana.

## Abstract

BARASUOL, Fernanda Vieira. **Development of polymeric nanocomposites for application as thermal and bactericidal coatings in civil construction.** Advisor: Fernando Machado Machado. Co-advisor: Carolina Ferreira de Matos Jauris. 2025. 145p. Dissertation (Doctorate in Materials Science and Engineering) – Graduate Program in Materials Science and Engineering – PPGCEM, Federal University of Pelotas, 2025.

The optimization of the thermal performance of buildings, along with the promotion of healthier indoor environments, is a continuous demand in the construction sector. In this context, the research and application of materials that enhance the energy and environmental efficiency of buildings becomes essential. Nanometric-scale materials, known as nanomaterials, exhibit interesting properties that, when applied in small quantities in the production of nanocomposite materials, can improve or develop new functionalities. Examples include graphene oxide (GO) and silver nanoparticles (AgNPs), which are nanomaterials that demonstrate antibacterial properties, mechanical strength, and thermal stability, among other properties. Aiming to contribute to the improvement of thermal comfort, combined with cleanliness and hygiene, in long-term occupancy environments, this research focuses on the development of hybrid materials incorporating AgNPs and GO into polymeric matrices for use as coatings (paint) in civil construction. In the first stage of the research, GO and AgNPs were synthesized, and the experimental conditions for developing nanocomposites using latex technology were optimized. The proportions of the nanostructures, the concentration of the AgNPs solution, and substrate tests were defined. The precursor materials were characterized by UV-vis spectroscopy and atomic force microscopy (AFM), GO by potentiometric titration and thermogravimetric analysis (TGA), and AgNPs by X ray diffraction (XRD). The films were morphologically characterized by AFM and scanning electron microscopy (SEM). Structural analyses were also performed, including infrared spectroscopy, Raman spectroscopy, mechanical and thermal analyses using infrared thermography. To assess antibacterial activity, microbiological analysis was conducted according to the CLSI M02 protocol, with modifications as necessary. The results show that the synthesis of the precursor materials aligns with the literature, displaying the characteristic peaks of GO and AgNPs. The XRD results of AgNPs confirm the reduction of silver ions to metallic silver nanoparticles. SEM results demonstrate good homogeneity of the nanocomposites, with no loose structures and nanoparticles well adhered to the polymer matrix. AFM images reveal that the presence of CTAB aids in the coalescence process of latex particles, and that sample roughness increases with the concentration of reinforcements. Furthermore, the nanocomposite samples exhibited lower hardness than the pure matrix, as well as greater adhesiveness. FTIR spectroscopy indicated that the incorporation of nanostructures does not alter the matrix structure. In tensile-deformation mechanical analyses, the isolated presence of reinforcements in the matrix, as well as most nanocomposites, increased the Young's modulus; however, the sample with both components in intermediate proportions – 1AgNP1GO – showed greater flexibility and elongation. Microbiological analyses did not indicate antimicrobial or antifungal activity of the nanocomposites, which may suggest particle aggregation, concentration issues, or isolation by the matrix. Thermographic analyses revealed that the 2AgNP2GO nanocomposite exhibited a surface temperature difference of up to -

4°C compared to other samples, indicating its potential as a promising coating material to enhance the thermal performance of buildings.

**Keywords:** nanocomposite; silver nanoparticles; graphene oxide; thermal efficiency; antibacterial activity.

## Lista de Figuras

Figura 1	Esquema mostrando a inércia térmica dos materiais.....	27
Figura 2	Exemplos de alótropos do carbono.....	31
Figura 3	Estruturas do grafeno e do GO.....	32
Figura 4	Medição da distribuição de temperatura na superfície dos compósitos	33
Figura 5	Forças de repulsão separando AgNPs com boro-hidreto adsorvido.....	37
Figura 6	Alguns mecanismos antibacterianos das nanopartículas de prata.....	39
Figura 7	AgNPs incorporadas em tecido.....	43
Figura 8	Processo de desenvolvimento do nanocompósito e atividade antimicrobiana.....	46
Figura 9	Análise de imagem térmica IR (infravermelho) das amostras aplicadas em (a) temperatura mais baixa (4°C), (b) temperatura ambiente (22°C), (c) temperatura alta (60°C) e (d) temperatura muito alta (80°C) Registro instantâneo e após um mês.....	48
Figura 10	Formação do filme em látex.....	50
Figura 11	Comportamento térmico medido em uma parede.....	54
Figura 12	Fluxograma da pesquisa.....	55
Figura 13	Dispersão aquosa contendo AgNPs obtidas no trabalho .....	57
Figura 14	Rota de preparo dos nanocompósitos.....	58
Figura 15	Exemplo de câmera termográfica.....	62
Figura 16	Placa cimentícia com as amostras de tinta comercial, dos nanocompósitos e mista.....	63
Figura 17:	Espectro de absorção molecular no UV-VIS da dispersão das AgNPs ...	65
Figura 18:	Espectro de absorção molecular no UV-VIS da dispersão do GO .....	66
Figura 19:	Difratograma de raios X das AgNPs. ....	67
Figura 20:	Curva de TGA do GO .....	68
Figura 21:	Amostras dos nanocompósitos: Primeiros testes. Imagem a – Nanocompósito depositado em becker de plástico, após secagem, com muitos	

aglomerados e filme não homogêneo. Imagem b – Filme após secagem em substrato de vidro – amostra já mais homogênea, sem espessante.....	69
Figura 22: Amostra depositada no substrato em processo de secagem e filme seco. Imagem a – Nanocompósito depositado em substrato de poliestireno, em processo de secagem. Imagem b – Filme após secagem. ....	70
Figura 23: Amostras dos filmes secos após otimização do processo. Imagem a – 02AgNP1GO, imagem b – 1AgNP1GO, Imagem c – 2AgNP2GO, imagem d – 2AgNP2GOE, imagem e – EAGO, imagem f – EAAgNPs, imagem g – EA .....	71
Figura 24: Microscopia eletrônica de varredura da amostra de GO puro. Imagens 1a, 1b, 1c e 1d - Folhas de GO .....	72
Figura 25: Microscopia eletrônica de varredura da amostra 02AgNP1GO. Imagens 2a, 2b, 2d (nanoestruturas aderidas à matriz), e 2c - Folha de GO aderida .....	73
Figura 26: Microscopia eletrônica de varredura da amostra 1AgNP1GO – Imagens 3a – nanoestruturas aderidas à matriz e 3b - folha de GO. ....	74
Figura 27: Microscopia eletrônica de varredura da amostra 2AgNP1GO. Imagens 4a e 4b - homogeneidade da matriz e boa adesão com as nanoestruturas .....	74
Figura 28: Microscopia eletrônica de varredura da amostra 2AgNP1GOE. Imagens 5a, 5b e 5c – nanocompósito com morfologia rugosa e sem estruturas soltas. ....	75
Figura 29: Microscopia eletrônica de varredura da amostra EAGO. Imagem 6a – Superfície homogênea. ....	76
Figura 30: Imagem de AFM do GO em modo topográfico.....	77
Figura 31: Imagem de AFM das AgNPs em modo topográfico.....	78
Figura 32: Imagem da Emulsão Acrílica (EA) em modo topográfico .....	80
Figura 33: Imagens em modo topográfico das amostras 01AgNP1GO, 2AgNP2GO, EAGO e EAAgNP.....	81
Figura 34: Imagem 3D da amostra 2AgNP2GO no modo topografia.....	82
Figura 35: Imagens em 3D - modo topografia, das amostras EA,02AgNP1GO, EAGO e EAAgNP.....	83
Figura 36: Imagens em modo topográfico de dureza das amostras: EA, 02AgNP1GO, 2AgNP2GO, EAGO e EAAgNP. ....	84
Figura 37: Imagens em modo topografia da força de adesão das amostras: EA, 02AgNP1GO, 2AgNP2GO, EAGO e EAAgNP. ....	86

Figura 38: Imagens em modo topografia do módulo de elasticidade das amostras: EA, 02AgNP1GO, 2AgNP2GO, EAGO e EAAgNP.....	88
Figura 39: Espectro FTIR da emulsão acrílica e das amostras dos nanocompósitos.....	89
Figura 40: Espectroscopia Raman dos materiais precursores e dos nanocompósitos .....	91
Figura 41: Imagem a – Força aplicada (N), imagem b – Tensão máxima (MPa), imagem c – alongamento (%), imagem d – tensão de escoamento (MPa) e imagem e – módulo de elasticidade (MPa) .....	93
Figura 42: Análises microbiológicas. Imagens a e b – <i>Klebsiella</i> , imagens c e d - <i>S. aureus</i> , imagens g e h - <i>P. aeruginosa</i> (bactérias) e imagens e e f - <i>C. albicans</i> (fungo) .....	97
Figura 43: Diâmetro da supressão do crescimento microbiano para a bactéria <i>S. aureus</i> ao redor da amostra de AgNPs.....	98
Figura 44: Primeira medição de temperatura superficial com câmera termográfica – 15h.....	99
Figura 45: Primeira medição de temperatura superficial com câmera termográfica – 15h30.....	100
Figura 46: Primeira medição de temperatura superficial com câmera termográfica – 16h.....	101
Figura 47: Segunda medição de temperatura superficial com câmera termográfica – 15h.....	102
Figura 48: Segunda medição de temperatura superficial com câmera termográfica – 16h.....	103
Figura 49: Proposta de mecanismo.....	105
Figura 50: Esquema ilustrativo dos objetivos da pesquisa.....	106

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1	Absortância (a) e emissividade (e) de alguns materiais e cores .....	30
Tabela 2	Componentes básicos das tintas .....	49
Tabela 3 –	Proporções dos componentes utilizados nos nanocompósitos.....	58
Tabela 4:	Comparativo entre os resultados encontrados por AFM para as diferentes amostras dos nanocompósitos .....	79
Tabela 5:	Comparativo das frequências experimentais encontradas na literatura (Faia, 2018; Pilz, 2004).....	90
Tabela 6:	Resumo dos resultados das médias das análises mecânicas para a emulsão acrílica e nanocompósitos .....	95

## Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
AFM	<i>Atomic force microscopy</i> (microscopia de força atômica)
AgNPGO	Amostras preparadas com emulsão acrílica, nanopartículas de prata e óxido de grafeno
AgNPs	Nanopartículas de prata
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i> (Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar-Condicionado)
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana de Testes e Materiais)
BLAST	<i>Building Loads Analysis and System Thermodynamics</i> (Análise de Cargas de Construção e Termodinâmica do Sistema)
CF	Ferrita de cobalto
CH	Hidróxido de cálcio
CSH	Silicato de cálcio hidratado
CTAB	<i>Cetyltrimethylammonium bromide</i> (Brometo de cetiltrimetilamônio)
CuO	Óxido de cobre
DLS	<i>Dynamic Light Scattering</i> (Espalhamento dinâmico de luz)
DRX	Difração de Raio X
EA	Amostra controle - emulsão acrílica pura e seca
EAGO	Amostra controle - emulsão acrílica e o óxido de grafeno
EFM	<i>Electrostatic force microscopy</i> (Microscopia de força eletrostática)
EMI	<i>Electromagnetic interference</i> (Interferência eletromagnética)
EPDM	Etileno-Propileno-Dieno-Monômero
EPS	Poliestireno Expandido
FTIR	<i>Fourier-transform infrared spectroscopy</i> (Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier)
GO	Óxido de grafeno
Gr-O	Óxido de grafite
HEBM	<i>High energy ball milling</i> (Moagem de bolas de alta energia)

HVAC	<i>Heating, Ventilating and Air Conditioning</i> (Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado)
IEA	<i>International Energy Agency</i> (Agência internacional de energia)
$\kappa$	Condutividade térmica
MET	Microscopia eletrônica de transmissão
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MGO	Óxido de grafeno magnético
MgO	Óxido de Magnésio
NBR	Norma brasileira
NP	Nanopartícula
NTC	Nanotubos de carbono
rGO	Óxido de grafeno reduzido
PCM	<i>Phase change materials</i> (Materiais de mudança de fase)
PEI	Polietilenoimina
PU	Poliuretano
PVA	Polialcool vinílico
TGA	<i>Thermogravimetric analysis</i> (Análises termogravimétricas)
TLS	Espectrometria de lente térmica
U	Coeficiente de transferência de calor
UV-Vis	Ultravioleta visível

## Sumário

<b>1. Introdução .....</b>	<b>19</b>
<b>2. Objetivos .....</b>	<b>21</b>
2.1 Objetivo geral .....	21
2.2 Objetivos específicos .....	21
<b>3. Justificativa .....</b>	<b>22</b>
<b>4. Conceitos gerais e revisão de literatura .....</b>	<b>24</b>
4.1 Energia elétrica e aquecimento global.....	24
4.2 Desempenho térmico em edificações .....	25
4.2.1 Propriedades térmicas dos materiais e elementos construtivos.....	26
4.2.2 Trocas térmicas - Condução, convecção e radiação.....	28
4.3. Nanomateriais de carbono.....	31
4.4 Nanopartículas de prata.....	37
4.5 Látices sintéticos.....	40
4.6 Nanocompósitos.....	41
4.7 Estado da arte - Utilização de nanopartículas de prata e óxido de grafeno em materiais nanocompósitos.....	43
4.8 Tintas.....	49
4.8.1 Tintas com propriedades antibacterianas .....	50
4.8.2 Tintas térmicas .....	51
<b>5 Metodologia .....</b>	<b>55</b>
5.1 Primeira etapa – Aquisição/ Síntese dos materiais precursores .....	55
5.1.1 Síntese do Óxido de Grafite (Gr-O) .....	55
5.1.2 Síntese do Óxido de Grafeno (GO) .....	56
5.1.3 Síntese das Nanopartículas de Prata (AgNPs) .....	56
5.1.4 Emulsão acrílica .....	57
5.2 Segunda etapa – Preparação das amostras dos nanocompósitos .....	57
5.3 Terceira etapa – Caracterização dos materiais precursores - Nanopartículas de prata e óxido de grafeno .....	59
5.3.1 Análises químicas.....	59
5.3.2 Análise estrutural.....	60
5.4 Caracterização dos nanocompósitos.....	60
5.4.1 Análises morfológicas.....	60

5.4.2 Análises estruturais.....	61
5.4.3 Análises mecânicas.....	61
5.4.4 Análise termográfica.....	61
5.4.5 Análise microbiológica.....	63
<b>6 Resultados.....</b>	<b>65</b>
6.1 Materiais precursores.....	65
6.1.1 Titulação potenciométrica do GO.....	65
6.1.2 - Espectroscopia UV-Vis do GO e das AgNPs.....	65
6.1.3 Análise estrutural por DRX.....	67
6.1.4 - Análise termogravimétrica do GO.....	68
6.2 Materiais nanocompósitos.....	69
6.2.1 Otimização de processo de preparo dos nanocompósitos .....	69
6.2.1.1 Morfologia.....	69
6.2.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	71
6.2.3 Microscopia de força atômica (AFM) .....	76
6.2.4 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier – FTIR .....	89
6.2.5 Espectroscopia Raman .....	90
6.2.6 Análises mecânicas .....	92
6.2.7 Análises microbiológicas .....	96
6.2.8 Análise termográfica .....	98
<b>7 Impactos esperados .....</b>	<b>106</b>
<b>8 Conclusões parciais .....</b>	<b>108</b>
<b>9 Estudos futuros .....</b>	<b>110</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>111</b>
<b>Apêndices .....</b>	<b>129</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A demanda por materiais de alta eficiência destinados à construção civil tem se intensificado nos últimos anos, impulsionando o desenvolvimento e a otimização de novas tecnologias. A ausência de conforto térmico em grande parte das edificações construídas acarreta a necessidade da utilização de sistemas artificiais de condicionamento de ar (Monteiro, 2024; Seixas, 2020), o que torna a edificação ineficiente energeticamente, contribuindo para uma maior demanda de energia elétrica. Da mesma forma, espaços de permanência sendo eles residenciais, comerciais ou de serviços, devem estar livres de proliferação de micro-organismos.

Nesse contexto, a busca por alternativas construtivas mais avançadas, por meio do emprego de materiais inovadores com reforços em escala nanométrica, tem sido objeto de inúmeros estudos na área (Alghrairi, 2025; Bernardo, 2024; Ruivo, 2021; Ramos, 2020; Bueno, 2020; Dias; Ramos; Florencio, 2021). A nanotecnologia abre um vasto leque de aplicações, sendo essencial a compreensão das propriedades dos materiais quando analisados em nível nanométrico, uma vez que essas características podem conferir benefícios significativos ao desempenho estrutural e funcional dos produtos desenvolvidos.

Nesse cenário, um dos nanomateriais que vêm sendo amplamente empregados como aditivo na produção de nanocompósitos é o óxido de grafeno (GO). O GO é um material da família do grafeno que é obtido pela esfoliação química do grafite (Matos, 2015). Uma de suas principais aplicações está relacionada às suas propriedades térmicas e mecânicas superiores, assim como a hidrofilicidade, o que facilita sua dispersão em diversos solventes orgânicos (Zhu *et al.*, 2010). Alguns exemplos são trabalhos abordando a utilização de resíduos da construção civil na fabricação de blocos cimentícios com adição de GO (Ramos, 2020), a utilização do GO em argamassa de revestimento (Corso *et al.*, 2020), ou em argamassa para reparo de estruturas (Ruivo, 2021).

Os nanocompósitos de matriz polimérica são materiais híbridos constituídos por uma fase contínua de polímero e uma fase dispersa composta por nanopartículas. Quando utilizadas como agentes de reforço, essas nanopartículas podem melhorar significativamente as propriedades do polímero, superando limitações físicas e mecânicas presentes no material puro (Fu *et al.*, 2019). Além disso, materiais nanoestruturados como as nanopartículas de prata (AgNPs), por

exemplo, aplicados a polímeros podem introduzir propriedades antimicrobianas (De Sá, 2025; Sa, 2015), o que é de extrema importância no que se refere, neste caso de estudo, à proliferação de mofo nas edificações.

Alguns exemplos de matriz que podem ser empregadas para a fabricação dos nanocompósitos são as resinas acrílicas. Alguns trabalhos desenvolveram alternativas para tintas à base de resina acrílica, utilizando nanocargas de argilominerais (Catarina, 2015), ou nanofibras de sílica em matrizes de resina acrílica de tintas (Santos, 2017). Esse último justifica a adição da carga para aplicação do compósito em tintas com características especiais, dentre elas o isolamento térmico. Kumar, Thomas e George (2024) trabalharam com materiais combinados para estudar o efeito das nanopartículas de dióxido de titânio ( $TiO_2$ ) na melhoria das propriedades antimicrobianas dos pigmentos naturais usados em tinta mural, na Índia. Noveliza e colaboradores (2024) investigaram como diferentes concentrações de óxido de magnésio ( $MgO$ ) afetam as propriedades antibacterianas de tintas para parede. Bui, Hong e Le (2025) estudaram diferentes concentrações de grafeno na resistência térmica, resistência à corrosão e morfologia da superfície de tintas de polímeros inorgânicos. Em relação ao desempenho térmico de edificações, Abdullah *et al.* (2024) pesquisaram sobre um revestimento bio-nanocompósito com capacidade de resfriamento passivo, visando reduzir a temperatura de superfícies expostas ao sol sem consumo de energia elétrica. Os autores utilizaram resíduos de biomassa de tamanho nanométrico como aditivos em materiais de revestimento. Outra pesquisa abordou o desenvolvimento de uma tinta bicamada em uma matriz acrílica a base de água, objetivando maior isolamento térmico e alta refletância. Os autores utilizaram na camada externa nanopartículas de  $TiO_2$  para refletância, e na camada inferior - microesferas de perlita expandida e partículas micrométricas de celulose, para isolamento (Caputo *et al.*, 2025).

Até o presente momento não foram encontrados trabalhos que abordam a utilização de nanomateriais híbridos a base de GO e AgNPs atuando como reforço para aprimoramento das propriedades de filmes acrílicos, objetivando aplicação como revestimento (pintura) na construção civil, aprimorando desempenho como isolante térmico (fornecido pelo GO) aliado à função antisséptica e bactericida (fornecida pelas AgNPs). A inexistência de estudos que explorem de forma conjunta

o sistema composto por GO, AgNPs e látex acrílico evidencia uma lacuna importante na literatura científica. Além disso, as informações sobre as propriedades individuais e sinérgicas desses materiais ainda são limitadas, o que reforça a relevância e a justificativa da escolha desse sistema para o presente projeto de pesquisa.

A motivação deste trabalho reside, portanto, na necessidade de desenvolver um material nanoestruturado inovador e multifuncional, capaz de: (i) reduzir a demanda energética por climatização artificial, promovendo conforto térmico passivo nas edificações; (ii) Inibir o crescimento de micro-organismos em ambientes internos, contribuindo para a saúde dos ocupantes; (iii) Valorizar o uso de nanomateriais sustentáveis e tecnologicamente avançados na construção civil.

A proposta deste trabalho de pesquisa visa a utilização de nanomateriais como GO e AgNPs como reforço para melhoria das propriedades de emulsões acrílicas, visando utilização como revestimento (pintura) na construção civil, buscando o incremento de propriedades antimicrobianas e de isolamento térmico.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho teve como objetivo geral o desenvolvimento de nanocompósitos poliméricos multifuncionais à base de látex acrílico, óxido de grafeno e nanopartículas de prata visando aplicação como tintas para revestimento na construção civil, tendo como foco a melhoria das atividades antimicrobianas e de isolamento térmico.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos da pesquisa, tem-se:

- Sintetizar e caracterizar o óxido de grafeno e as nanopartículas de prata;
- Otimizar a condição experimental de formação dos nanocompósitos e compatibilização em meio aquoso entre a matriz polimérica – emulsão acrílica comercial - com as nanopartículas de prata/ óxido de grafeno;

- Verificar as características morfológicas e estruturais dos nanocompósitos preparados;
- Avaliar propriedades mecânicas dos nanocompósitos;
- Avaliar a ação antimicrobiana da tinta obtida; e
- Realizar o teste real da eficiência térmica da amostra aplicada como revestimento, utilizando a leitura infravermelha com o auxílio de uma câmera termográfica.

### **3 JUSTIFICATIVA**

Muitas edificações, por diversos motivos, não apresentam adequado conforto térmico em seu interior, ocasionando desta maneira a necessidade da utilização de sistemas artificiais de condicionamento de ar, demandando mais energia elétrica e com isso, prejudicando o meio ambiente. Ainda, espaços interiores de permanência prolongada necessitam de higiene, limpeza e controle de microrganismos, onde muitas vezes é necessário um complemento de revestimentos/produtos para este fim.

Em razão da necessidade da busca-desenvolvimento de materiais inteligentes e de alta eficiência, esta proposta de projeto apresenta como tema a preparação de nanocompósitos poliméricos para futuras aplicações como revestimento para a melhoria do conforto térmico e eficiência bactericida para construção civil. A busca por possibilidades construtivas que visem a preservação do existente, a elevação do bem-estar do usuário e o aumento da vida útil das edificações é um tema de relevância social, ambiental e econômica.

O GO é um derivado da família do grafeno amplamente estudado para uso em materiais compósitos. O uso deste como carga tem como foco melhorar diversas propriedades, dentre elas as mecânicas, além de ser um material com propriedades hidrofílicas – o que auxilia na sua composição com outros materiais, em especial os poliméricos. As AgNPs, por sua vez, são utilizadas em muitos estudos em função de suas propriedades bactericidas. Ambos os materiais podem ser utilizados em baixas quantidades, desta forma melhorando consideravelmente as propriedades da matriz.

A proposta justifica-se pela necessidade do desenvolvimento de materiais eficientes, os quais poderão ser aplicados em edificações, contribuindo assim para

a preservação do bem-estar humano e ambiental, ao possibilitar a redução do consumo energético.

## 4 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

### 4.1 Energia elétrica e aquecimento global

A energia tem participação significativa nas discussões econômicas e ambientais relacionadas à sustentabilidade, visto que tem importante relação com impactos como aumento de poluição, efeito estufa e outras questões ambientais (De Almeida, 2025). Segundo Philippi Jr e Reis (2016), ao longo do tempo, estabeleceu-se um consenso de que é possível manter o crescimento econômico com a utilização de menos energia, se houver mais eficiência na utilização dos recursos.

A busca por sustentabilidade energética está diretamente associada ao conforto térmico e requer mudanças na construção civil (Minusculli, 2022). A necessidade de materiais inovadores para utilização na melhoria do conforto térmico de edificações é alvo de muitas pesquisas (Poyyamozhi *et al.*, 2025; Ferreira, 2024; Moraes e Prado, 2020; Yabuki, Otini, Celani, 2020; Aguilar, 2021; Spinelli *et al.*, 2019) com o objetivo de alcançar o desempenho térmico necessário para o bem-estar e habitabilidade.

Hinrichs e Kleinbach (2014) mencionam que soluções mais ambientalmente amigáveis e menos onerosas para controle térmico das edificações consistem nas técnicas de resfriamento passivo, ou seja, controlar a transferência de calor que um ambiente recebe do envelope da sua edificação. Algumas técnicas são a utilização de materiais de mudança de fase (Ghamari *et al.*, 2024), em sistemas de paredes, telhados e janelas. Ainda, podem ser encontrados na literatura trabalhos abordando a utilização de tintas com dióxido de titânio ( $TiO_2$ ) para resfriamento radiativo passivo (Lai *et al.*, 2025).

A melhoria do conforto térmico nas edificações pode incluir aspectos como: escolha de local, orientação, presença de vegetação; aspectos da arquitetura, como projeções, dimensões de aberturas e sombreamentos; e aspectos do revestimento das edificações, tais como isolamento e capacidade térmica.

## 4.2 Desempenho térmico em edificações

Segundo a ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*), conforto térmico é definido como: "Um estado de espírito que reflete satisfação com o ambiente térmico que envolve a pessoa" (Bogo *et al.*, 1994, p.11). É o bem-estar do homem em relação ao ambiente em que está inserido. O desconforto acontece quando não ocorre o balanço térmico (Lamberts, Dutra, Pereira, 2014).

As cartas bioclimáticas, baseadas nas zonas de conforto térmico e nos elementos de previsão de comportamento térmico de edificações, possuem três informações associadas: comportamento climático do entorno, previsão de estratégias para correção desse comportamento climático através do desempenho esperado na edificação e zona de conforto térmico (Bogo *et al.*, 1994). Uma das questões relativas à importância dos estudos a respeito do conforto térmico, além da satisfação e produtividade humanas, é a questão da conservação da energia, visto que hoje grande parte dos espaços que as pessoas passam o tempo são condicionados artificialmente. Segundo o autor, é importante a utilização de estratégias passivas de aquecimento/resfriamento, reduzindo a necessidade de sistemas artificiais de condicionamento de ar, consequentemente economizando energia.

A Agência Internacional de energia (IEA, 2013) define diretrizes para aplicação na envoltória das edificações para melhoria da eficiência energética. Entre as recomendações, estão o uso de isolantes térmicos inclusive em climas quentes, levando em consideração a utilização correta da ventilação natural, entre outros fatores, assim como o conhecimento do clima e das características construtivas (Seixas, 2020).

A norma de desempenho da ABNT NBR 15575 estabelece critérios de desempenho das edificações, dentre eles o desempenho térmico. Segundo a norma, as edificações estão dispostas em uma zona bioclimática - definida pela ABNT NBR 15220-3, que reúne determinadas características, como localização geográfica e dados climáticos, para determinação do desempenho térmico. Pode-se avaliar o desempenho térmico por simulação computacional, o qual deverá utilizar como referência esses dados climáticos a respeito de cada zona. A norma recomenda o programa *EnergyPlus* para a simulação computacional. Na NBR

15220-2 pode-se encontrar tabelas com principais propriedades térmicas dos materiais de construção, assim como métodos de cálculo.

#### **4.2.1 Propriedades térmicas dos materiais e elementos construtivos**

O comportamento dos materiais depende, entre outros fatores, das suas propriedades térmicas. Essa propriedade corresponde à resposta do material à aplicação de calor, pois ao absorver essa energia (na forma de calor), ocorre um aumento da temperatura e das dimensões. Algumas propriedades são a expansão térmica – variação do comprimento de um material em função da temperatura, se expandindo ou contraindo - , a capacidade calorífica, que é a quantidade de energia exigida para produzir um aumento unitário de temperatura, e a condutividade térmica, que consiste na habilidade de um material em transferir calor (Callister, 2002). Esta propriedade se dá pela equação 1:

$$*q = k \frac{dT}{dx} \quad (\text{Eq. 1})$$

onde  $*q$  é o fluxo de calor por unidade de tempo por unidade de área (a área perpendicular à direção do escoamento),  $k$  é a condutividade térmica, e  $dT/dx$  é o gradiente de temperatura através do meio de condução.

Quanto aos mecanismos de troca de calor, o mesmo é transportado através de fônons, ou por elétrons livres, sendo a condutividade total a soma das duas contribuições (Callister, 2002).

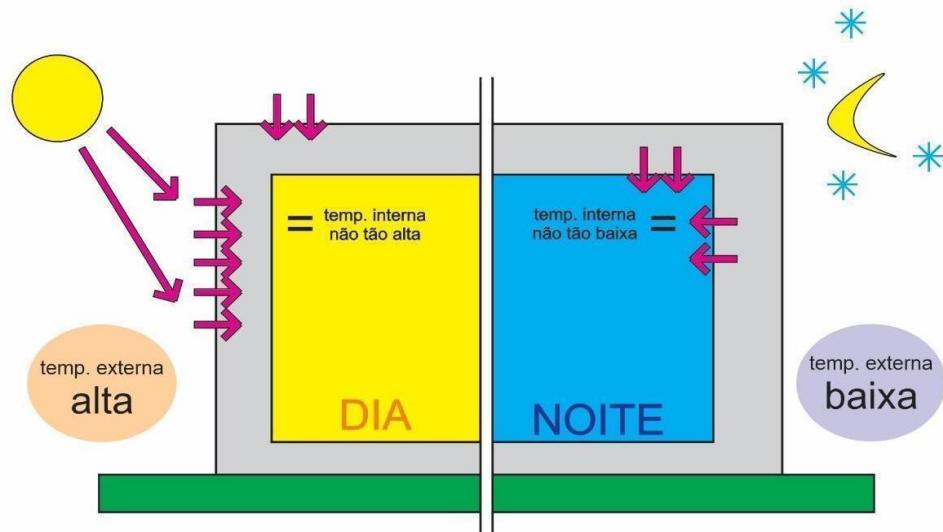
Os ganhos térmicos em ambientes são, em sua maior parte, advindos da parcela de radiação que é transmitida para o interior. No caso dos fechamentos opacos, ocorre a transmissão de calor quando há a diferença de temperatura entre as superfícies exterior e interior, indo da mais quente para a mais fria. Alguns materiais são utilizados para isolar termicamente a edificação, como a lã de vidro, cortiça e isopor. Por serem materiais porosos, o ar no interior dos poros possui baixa condutividade térmica, contribuindo para torná-los isolantes térmicos (Lamberts, Dutra, Pereira, 2014).

Materiais isolantes térmicos apresentam um importante papel no que diz respeito ao planejamento e construção de edificações com eficiência energética,

sendo uma ferramenta importante para a melhoria do comportamento energético (Papadopoulos, 2005). Há uma rápida evolução das pesquisas para novos materiais inteligentes, como isolantes transparentes, dinâmicos e com condutividades térmicas variáveis. Materiais de isolamento sustentáveis, com baixa energia incorporada e reduzido impacto ambiental, têm impulsionado o surgimento de soluções inovadoras no mercado. Além de aumentar a eficiência energética em edificações, esses isolantes contribuem significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa (Ali *et al.*, 2024).

Uma outra característica interessante dos materiais é a sua inércia térmica, ou seja, é a capacidade do material de reter o calor em seu interior. Quanto maior a inércia térmica, maior o calor retido. Materiais de boa inércia térmica podem ser eficientes quando temperaturas oscilam entre altas e baixas, podendo o calor ser acumulado durante o dia e liberado durante a noite, que geralmente é mais fria (Frota, 2006). Abaixo, na Figura 1, um exemplo do mecanismo.

Figura 1 – Esquema mostrando a inércia térmica dos materiais



Fonte: Adaptado de Lamberts, Dutra e Pereira (2014)

Um projeto construtivo que conte com a escolha de materiais que possibilitem o controle da passagem da alta temperatura para o interior das edificações, retardando a liberação de calor, são alternativas eficientes para a

melhoria do conforto térmico, com isso, possibilitando o aumento da qualidade de vida e a sustentabilidade energética como um todo.

A massa térmica de um edifício, determinada pela sua composição e densidade, permite absorver, armazenar e liberar calor de forma gradual, influenciando diretamente sua inércia térmica — a capacidade de responder lentamente às variações de temperatura externa (De Menezes, 2024; Verbeke, Audenaert, 2018). Esse comportamento térmico é essencial para o conforto e eficiência energética, sendo afetado por fatores como o clima local, o nível de isolamento das envolventes e o modo de uso do edifício, além de depender das trocas térmicas por condução, convecção e radiação que ocorrem entre os elementos construtivos e o ambiente.

#### **4.2.2 Trocas térmicas - Condução, convecção e radiação**

Trocas térmicas são os mecanismos de dissipação de calor entre o corpo e o ambiente. Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2014), caracterizam-se por trocas térmicas secas os fenômenos de condução, convecção e radiação, sendo esse calor perdido para o ambiente chamado de calor sensível. Por troca úmida caracteriza-se a evaporação, e o calor o qual envolve mudanças de fase é chamado de calor latente.

De acordo com Kreith, Manglik e Bohn (2015), são reconhecidas três modalidades distintas de transmissão de calor, já mencionadas anteriormente: condução, radiação e convecção. Na condução de calor, sempre que um gradiente de temperatura existir em meio sólido, o calor fluirá da região de temperatura mais alta para a de temperatura mais baixa, através de uma troca de energia intermolecular.

Para o transporte de calor em regime estacionário, segundo Callister (2002), o fluxo é proporcional ao gradiente de temperatura ao longo da direção do escoamento, sendo constante de proporcionalidade a condutividade térmica.

Já na convecção, ao menos um dos corpos é um fluido, ocorrendo o processo primeiramente transmitindo o calor por condução, e depois ocorre uma mudança de densidade em função da alteração sofrida pela temperatura, que é quando ocorre a convecção (Lamberts, Dutra, Pereira, 2014).

Radiação térmica é a energia emitida por toda matéria que se encontre a uma temperatura não nula (Moran, Shapiro, Munson, 2005). Segundo Lamberts (2016), na radiação, o calor do corpo mais quente se converte parcialmente em energia radiante, chegando ao sólido de menor temperatura para ser absorvido (dependendo das propriedades da superfície do corpo receptor) novamente transformado em forma de calor.

A radiação solar possui alta energia no espectro visível, diferenciando-se de fontes comuns como superfícies aquecidas. Por isso, seu impacto no ambiente térmico de edificações requer atenção especial. Compreender essas características é essencial para aplicar estratégias eficazes de sombreamento, isolamento e controle solar, que contribuem para o conforto interno e a eficiência energética. Essa radiação pode aquecer rapidamente superfícies internas via radiação térmica (Zhang e Zhengrong, 2025).

Materiais que tenham aquecimento reduzido, absorvendo menos a radiação solar proporcionam, consequentemente, menores ganhos de calor e assim, aumentam o conforto térmico no interior das edificações. Através da termografia (Silvia, Batista, Povoas, 2019; Kyllili, 2014), podem-se gerar imagens térmicas a partir da detecção da radiação infravermelha, mapeando os gradientes de temperatura na superfície dos elementos.

Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2014), cada elemento construtivo tem um desempenho em relação a radiação incidente. A superfície pode transmitir, refletir, absorver e emitir. Um material que apresenta cor escura absorve maior radiação do que um material de cor clara. O conceito de emissividade diz respeito à capacidade da emissão de energia por radiação de sua superfície, sendo a quantidade de energia térmica emitida por unidade de tempo. Já a absorvidade é a parcela que é absorvida pela superfície. Na tabela da norma NBR 15220-2 (Tabela 1), pode-se observar a absorvância ( $\alpha$ ) e a emissividade ( $\epsilon$ ) de alguns materiais e cores.

Tabela 1 - Absortância ( $\alpha$ ) e emissividade ( $\epsilon$ ) de alguns materiais e cores

<b>Tipo de superfície</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>\epsilon</math></b>
Chapa de alumínio (nova e brilhante)	0,05	0,05
Chapa de alumínio (oxidada)	0,15	0,12
Chapa de aço galvanizada (nova e brilhante)	0,25	0,25
Caiação nova	0,12 / 0,15	0,90
Concreto aparente	0,65 / 0,80	0,85 / 0,95
Telha de barro	0,75 / 0,80	0,85 / 0,95
Tijolo aparente	0,65 / 0,80	0,85 / 0,95
Reboco claro	0,30 / 0,50	0,85 / 0,95
Revestimento asfáltico	0,85 / 0,98	0,90 / 0,98
Vidro incolor	0,06 / 0,25	0,84
Vidro colorido	0,40 / 0,80	0,84
Vidro metalizado	0,35 / 0,80	0,15 / 0,84
Pintura:		
Branca	0,20	0,90
Amarela	0,30	0,90
Verde Clara	0,40	0,90
"Alumínio"	0,40	0,50
Verde Escura	0,70	0,90
Vermelha	0,74	0,90
Preta	0,97	0,90

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15220-2

Já na condutividade térmica, as propriedades dos componentes são relevantes no mecanismo de condução do envoltório da edificação (Minusculli et al., 2022). A condutividade térmica é dependente da densidade do material e representa a capacidade em conduzir maior ou menor quantidade de calor por unidade de tempo.

Dois mecanismos principais envolvem a condução de calor nos materiais de engenharia, sendo as vibrações atômicas (fônonos) ou a condução por elétrons livres. Cerâmicas e polímeros, sendo geralmente maus condutores térmicos, transportam energia pela vibração atômica. Quanto aos metais, bons condutores, a energia cinética dos elétrons condutores – livres – possibilita, em muitos casos uma condução térmica mais eficiente do que as vibrações atômicas (Shackelford, 2008).

Minusculli e colaboradores (2022) concluíram em seu trabalho que uma edificação composta por múltiplas camadas apresenta menor taxa de transferência de calor. Os autores atribuem devido a energia ser conservada, pois a energia

cedida por metais e não-metais ocorre a partir de vibrações atômicas ordenadas, transferindo a energia de um ponto ao outro. No caso de múltiplos materiais, ocorre uma perda na energia térmica transferida, melhorando assim seu isolamento.

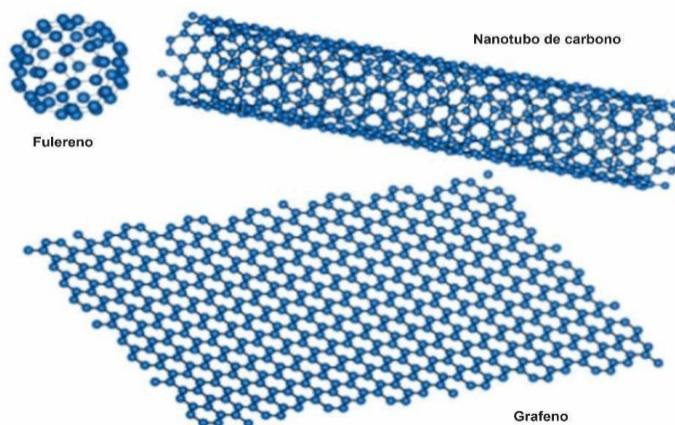
Alguns materiais que apresentam propriedades térmicas interessantes, especialmente no que diz respeito à condutividade térmica são os nanomateriais de carbono, como grafeno, nanotubos de carbono e fulerenos, os quais serão abordados no próximo capítulo desta pesquisa.

#### **4.3 Nanomateriais de carbono**

Considerado um dos elementos químicos mais abundantes no mundo (Bueno, 2011), o carbono é um material que possui alótropos com propriedades e características interessantes para inúmeras aplicações, sendo um elemento promissor para a economia do país (Zarbin, Orth, 2020). Zarbin e Oliveira (2013) consideram esses diferentes alótropos como elementos relevantes para a área tecnológica, industrial, econômica e social. Dentre alguns nanomateriais derivados do carbono podem-se citar os fulerenos, nanotubos de carbono (NTC) e o grafeno.

O grafeno é um material bidimensional (2D), ou seja, é considerado uma camada de átomos de carbono. É composto por átomos dispostos em uma rede com formato análogo a de um favo de mel. O grupo liderado pelos pesquisadores Novoselov e Geim isolou pela primeira vez esse material (Novoselov *et al.*, 2004). Na Figura 2 podemos observar alguns alótropos do carbono, citados anteriormente:

Figura 2: Exemplos de alótropos do carbono



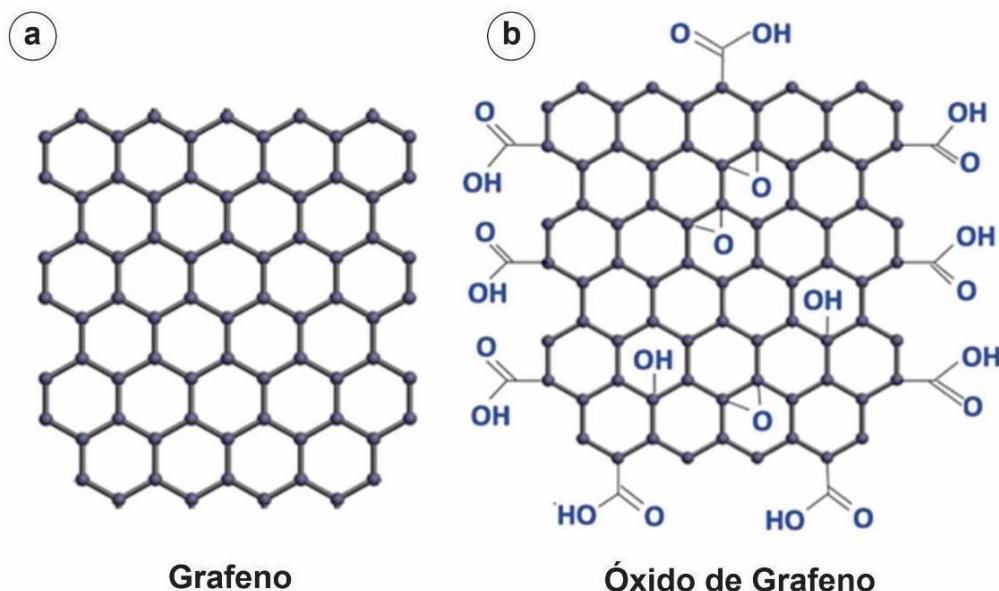
Fonte: Adaptado de Soldano, Mahmood, Dujardin (2010)

Algumas propriedades interessantes do grafeno são a condutividade térmica, (aproximadamente 5000W/mK), elétrica e resistência mecânica (Bueno, 2011), alta área superficial, além de uma ótima flexibilidade (Neto; Geim, 2012). Estudos também relatam as propriedades antibacterianas do grafeno puro e seus derivados - GO e rGO (Kurantowics *et al.*, 2015), mostrando diferentes interações da bactéria de acordo com a forma do grafeno, e mostrando a eficiência antibacteriana em todos os derivados, sendo o melhor desempenho do GO.

Sendo um material da família do grafeno, o óxido de grafeno (GO) pode ser obtido pela oxidação química do grafite seguido de esfoliação (Bokobza, 2017). Esse apresenta grupos funcionais, tendo as bordas hidrofílicas e corpo hidrofóbico, possuindo grupos hidroxila e epóxi em seu plano basal e, nas bordas das folhas, os grupos carboxílicos (Matos, 2015; Bokobza, 2017).

Segundo Jaworski *et al.* (2018), o GO é facilmente disperso em água - e outros solventes - devido a presença de seus grupos oxigenados, os quais permitem a funcionalização das folhas do GO por ligações covalentes e não covalentes. Na Figura 3 pode-se observar as estruturas do grafeno (Imagem a) e do GO (Imagem b).

Figura 3: Estruturas do grafeno e do GO



Fonte: Adaptado de Kausar (2021)

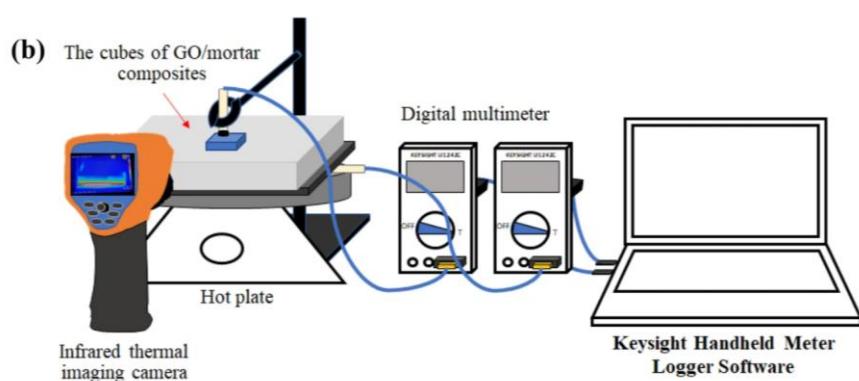
A oxidação severa da rede grafítica torna o GO não apenas eletricamente, mas também termicamente isolante (Dimiev, Eigler, 2016). Pesquisas confirmaram que a incorporação do GO em aerogéis tem potencialidades de auxiliar no isolamento térmico, em função de seus grupos hidrofílicos, auxiliando na dispersão de outros materiais (Xue *et al.*, 2021). Evidencia-se a possibilidade de serem utilizados como compósitos na construção civil, economizando energia e contribuindo com o meio ambiente.

Pesquisas recentes investigam o impacto da adição do GO nas propriedades mecânicas e térmicas de compósitos de argamassa de cimento. No estudo de Janjaroen *et al.* (2022), os autores utilizaram diferentes concentrações de GO (0, 0,01, 0,03, 0,05 e 0,1% em peso) e observaram que a presença de GO melhora significativamente a resistência mecânica e a capacidade de isolamento térmico dos compósitos.

Os referidos pesquisadores analisaram a capacidade de isolamento térmico dos compósitos obtidos utilizando uma câmera termográfica, recurso empregado para a avaliação da distribuição de temperatura na superfície dos materiais. Nesta pesquisa, será adotada metodologia equivalente, com a mesma finalidade.

A Figura 4 abaixo mostra a medição do comportamento isolante térmico dos materiais utilizando uma câmera termográfica para verificação da distribuição de temperatura na superfície dos compósitos, similar a utilizada nesta pesquisa para os mesmos fins.

Figura 4: Medição da distribuição de temperatura na superfície dos compósitos



Fonte: Adaptado de Janjaroen *et al.* (2022)

Os resultados indicam que o GO interage com fases como hidróxido de cálcio (CH), silicato de cálcio hidratado (CSH) e etringita, contribuindo para a melhoria das propriedades estruturais. A melhor performance foi registrada na amostra com 0,05% de GO, que apresentou maior resistência à compressão e tração, além de uma taxa reduzida de transferência de calor de aproximadamente 0,465 W/min. Ainda, os autores afirmam que a condutividade térmica diminui com o aumento do teor de GO, devido a sua baixa condutividade térmica e isolamento das folhas do GO, além das suas boas interações entre as fases, conforme já mencionado.

Ainda sobre as propriedades térmicas do GO, o artigo de Eyssa *et al.* (2024) investiga as propriedades físico-químicas e a retardância de chama de nanocompósito de borracha de etileno propileno dieno (EPDM) irradiados, explorando sua possível aplicação como materiais isolantes. O estudo desenvolve um novo tipo de borracha EPDM incorporada com  $\text{Al(OH)}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e GO para reduzir sua inflamabilidade. O GO influencia a estabilidade térmica e mecânica do compósito, proporcionando uma estrutura mais eficiente para uso em ambientes exigentes.

A pesquisa de Razaq *et al.* (2022) apresenta uma revisão a respeito de compósitos flexíveis utilizando grafeno, GO e óxido de grafeno reduzido (rGO). O estudo aborda suas propriedades térmicas, assim como aplicações. A pesquisa mostra que esses materiais possuem uma ótima estabilidade térmica, sendo alternativas para dispositivos flexíveis e equipamentos eletrônicos.

No trabalho de pesquisa de Tripathy *et al.* (2023), os autores exploraram propriedades mecânicas e térmicas de nanocompósito de poliamida-6 (PA6) reforçados com GO. Na técnica, foi utilizado o método de dupla extrusão. O objetivo foi garantir a dispersão uniforme do material. Com diferentes concentrações de GO (1, 3, 5 e 7 partes por cem), os pesquisadores observaram que o processo de extrusão utilizado resulta em compósitos com uma boa estabilidade mecânica e térmica. Os resultados indicam que a presença de GO aumenta a temperatura de transição vítreia, trazendo maior estabilidade térmica.

Já no trabalho da equipe de Khabibullin *et al.* (2023), pode-se observar que foram analisadas as propriedades termofísicas e físico-químicas de dispersões aquosas de GO utilizando espectrometria de lente térmica (TLS). Os pesquisadores descobriram que, à medida que a concentração de nano fase aumenta, a difusividade térmica do GO atinge um mínimo, o que pode ser explorado para aplicações de isolamento térmico. Os autores, em uma das suas muitas conclusões a respeito do resultado das análises, observaram que as dispersões de GO exibem boas propriedades de isolamento térmico em um nível de concentração de 0,1 mg/L.

De acordo com Hong-Li *et al.* (2018), em sua abordagem sobre aerogéis utilizando sílica e GO, foi apontada uma diminuição da condutividade térmica do compósito (de 0,025W/mK para 0,018W/mK), utilizando o percentual de 1,5% em massa de GO como reforço, melhorando assim as características de isolamento térmico, provavelmente pela eficiente dispersão e manutenção da porosidade. Contudo, o estudo ainda mostrou que na medida que o teor de GO aumenta, a condutividade térmica também aumenta, o que pode ser causado por densificação ou formação de caminhos térmicos. Ainda, outras pesquisas utilizando aerogel de sílica incorporando GO (Lei *et al.*, 2017), provaram a diminuição da condutividade térmica, reduzida de 0,0089 W/mK para 0,0072 W/mK. Os autores analisaram um possível mecanismo, no qual acontece uma alteração na estrutura dos poros devido à adição de GO na matriz de sílica. Ainda, a utilização do GO potencializa a estabilidade térmica do compósito, visto que as nanofolhas dificultam o caminho de propagação do calor. A pesquisa de Khedkar, Somvanshi e Jadhav (2024) investigou a incorporação de GO em aerogéis de sílica, mostrando também um aumento da estabilidade térmica, assim como melhoria da sua hidrofobicidade e aumento da sua resistência mecânica.

No artigo de Liu *et al.* (2025), os autores apontaram que a estrutura de ponto-superfície do GO modificado ( $\text{SiO}_2+\text{GO}$ ) contribui para a melhoria da dispersão do material na matriz polimérica, reduzindo a geração de calor. Com a modificação, ocorre um aumento no espaçamento entre as camadas de GO, assim como na área de contato com a borracha. Esse fenômeno possibilita um menor acúmulo do calor, e consequentemente maior eficiência térmica.

Um dos fatores que contribuem para a redução da condutividade térmica do grafeno é a presença de defeitos estruturais. O trabalho de Rohman, Mohiuddin e Selvaraj (2024) menciona que os defeitos estruturais podem impactar significativamente a condutividade térmica do grafeno, reduzindo sua eficiência na transferência de calor. Estudos indicam que a presença de defeitos pontuais, linhas de defeitos e arranjos estendidos pode tornar a condutividade térmica anisotrópica e diminuir seu valor em uma ou duas ordens de magnitude em relação ao grafeno puro, sem defeitos. Isso ocorre principalmente devido à redução do caminho livre médio dos fônons, que são responsáveis pelo transporte de calor no material.

Roy *et al.* (2020), em seu estudo sobre a colocação de revestimento flexível com GO serigrafado, para fins de melhoria do conforto térmico nas edificações utilizando o GO como parte de um revestimento absorvedor térmico (GO + material de mudança de fase + substrato), aponta que os revestimentos absorvem o calor latente e são capazes de armazenar energia térmica.

Akhavan (2010) em seu estudo relatou a atividade antibacteriana do GO, no qual as bordas “afiadas” de nanofolhas de GO, pelo contato direto com a bactéria, causam danos e perda da integridade das membranas bacterianas. De acordo com o trabalho de Pulingam *et al.*, (2021) alguns fatores influenciam na atividade antibacteriana do GO, como por exemplo o tamanho da folha. Segundo os autores, a atividade antibacteriana pode aumentar à medida que o tamanho das folhas de GO diminui, quando testada na forma de revestimentos de superfície.

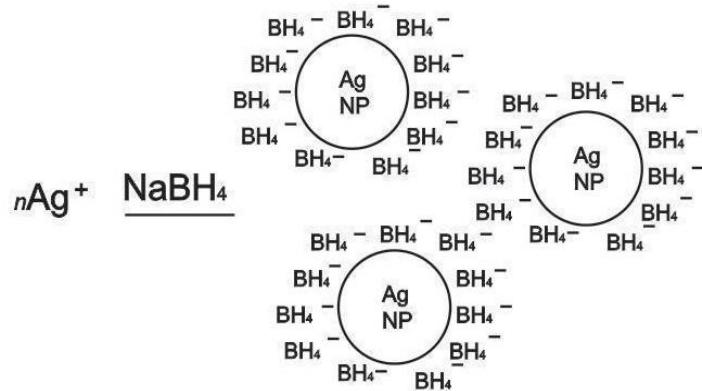
O estudo de Tohamy e El-Masry (2024) apresenta a síntese e os efeitos do óxido de grafeno anfifílico (GO-SB), obtido a partir da carbonização de bagaço de cana-de-açúcar, na melhoria da atividade antibacteriana e das propriedades térmicas de filmes de hidrogel de etilcelulose (EC) e polialcool vinílico (PVA). Foram observados o aumento na estabilidade térmica e redução da degradação térmica, tornando-os mais resistentes ao calor. Além disso, os testes antibacterianos mostraram que os hidrogéis modificados apresentaram maior capacidade de inibição contra bactérias *Micrococcus leutus*.

Além disso, a resistência à passagem de água, propriedades anti riscos e flexibilidade são algumas das vantagens da utilização do GO como alternativa em revestimento para as edificações na construção civil.

#### 4.4 Nanopartículas de prata

Entre os nanomateriais metálicos inovadores, as nanopartículas de prata (AgNPs) têm despertado grande interesse entre os pesquisadores, graças às suas notáveis propriedades físico-químicas. Existem diversos métodos de síntese para as nanopartículas metálicas, podem ser sintetizadas através de métodos químicos baseados na redução de íons metálicos, assim como decomposição de precursores, formando átomos. Em geral, para obter AgNPs, utiliza-se o nitrato de prata nas sínteses como material precursor. Este pode ser reduzido com álcoois, ácido ascórbico, borohidreto de sódio, entre outros redutores. Ainda, pode-se ou não utilizar estabilizantes no processo (Mehl, 2015). Uma das formas de garantir a estabilidade das suspensões é adicionando íons hidreto (Mulfinger *et al.*, 2007), como pode-se observar na Figura 5, onde eles adsorvem na superfície e criam as repulsões eletrostáticas entre as nanopartículas (Benedito, 2017).

Figura 5: Forças de repulsão separando AgNPs com boro-hidreto adsorvido



Fonte: Adaptado de Mulfinger *et al.* (2007)

Ainda, a estabilização pode ser estérica, ou seja, através da presença de moléculas grandes ligadas à superfície das nanopartículas, evitando a agregação das mesmas (Mehl, 2015).

No estudo de Aliero *et al.* (2025), em uma análise bibliométrica a respeito de sínteses verdes para nanopartículas de prata, os autores ressaltam a importância de aprofundar o conhecimento sobre a síntese e os mecanismos antibacterianos

das AgNPs, além da necessidade de aprimorar o processo de produção para maximizar sua eficiência e estabilidade, reduzindo a utilização de substâncias tóxicas.

De acordo com Yu, Yin e Liu (2013), as AgNPs podem ser utilizadas em aplicações médicas, purificadores de água e como desinfetantes, devido a estas ótimas propriedades físicas e antibacterianas. Os autores fazem uma revisão e um alerta a respeito dos riscos ambientais da liberação deste nanomaterial no ambiente. McGillicuddy *et al.* (2017) também enfatizaram em seu trabalho a necessidade de um estudo aprofundado do impacto ambiental causado pelas AgNPs, em função das mesmas estarem incorporadas em diversos produtos de consumo.

Pelas suas notáveis propriedades, em especial a atividade antimicrobiana, as AgNPs são utilizadas, dentre outras situações, em revestimentos como tintas para a construção civil. Hu e colaboradores (2020) desenvolvem em seu trabalho uma tinta com nanoemulsão de nanopartículas estáveis de prata, sintetizadas pelo método de nanoemulsão usando monooleato de polioxietileno sorbitano (Tween 80), que funciona como surfactante, redutor e estabilizador. A tinta proposta apresentou alta estabilidade e boa condutividade elétrica.

As AgNPs atuam como agentes bactericidas e fungicidas por meio de múltiplos mecanismos sinérgicos: liberam íons Ag<sup>+</sup> que interagem com proteínas, membranas e ácidos nucleicos, causando disfunções celulares; aderem e rompem a membrana celular, levando à perda de integridade e conteúdo; induzem a formação de espécies reativas de oxigênio (ROS), provocando danos oxidativos ao DNA, lipídios e proteínas; e interferem na replicação do DNA e na síntese de proteínas (Salleh *et al.*, 2020). No caso de fungos, também inibem a germinação de esporos e comprometem a estrutura da parede celular. O estudo de Bocate *et al.* (2019) investigou o efeito antifúngico das AgNPs e da simvastatina (SIM), isoladamente e em combinação, contra espécies toxigênicas de fungos, comprovando atividade antifúngica significativa.

É importante salientar que a eficácia antimicrobiana das AgNPs depende de diversos fatores físico-químicos e biológicos que afetam sua interação com os microrganismos. Misirli, Patricio e Abrantes (2022) apontam em seu trabalho uma revisão de alguns fatores que influenciam, tais como: morfologia e orientação

cristalográfica, onde faces de alta densidade atômica são mais reativas; tamanho das nanopartículas (Naser *et al.*, 2025), mostrando que menores AgNPs apresentam maior área superficial, tendo assim um maior efeito bactericida; a utilização de estabilizantes na síntese, e ainda outros fatores como temperatura e pH.

Abaixo, na Figura 6 pode-se observar alguns mecanismos antibacterianos das nanopartículas de prata.

Figura 6: Alguns mecanismos antibacterianos das nanopartículas de prata.



Fonte: A autora (2025)

O estudo de Hussain, Saleem e Gao (2025), demonstra a reutilização de cinzas volantes de carvão, um subproduto rico em sílica das usinas termelétricas, para desenvolver um revestimento de tinta de silicato dopado com prata. O objetivo da pesquisa foi criar uma camada hidrofóbica e antimicrobiana para tecidos, além de aprimorar a separação óleo-água. A pesquisa demonstra que a incorporação de nanopartículas de prata em membranas de silicato melhora significativamente a atividade antimicrobiana e a eficiência na separação de líquidos, sem toxicidade celular. As análises antibacterianas mostram que o revestimento de Ag@SiO<sub>2</sub> elevou a taxa de atividade antimicrobiana do tecido de algodão puro de 17% para 100% contra *E. coli* e *S. aureus*, mantendo sua eficácia por mais de 72 horas.

## 4.5 Látices sintéticos

De acordo com Rippel (2005), algumas plantas produzem uma dispersão coloidal contendo partículas de borracha, assim como constituintes não borracha. Um Látex é considerado uma dispersão de partículas poliméricas em meio aquoso (Mark, 2013), e podem ser sintéticos ou naturais. Segundo Valadares (2005), algumas características no estado coloidal são o tamanho, distribuição e forma das partículas, como também a parcela de massa do polímero.

Látices sintéticos artificiais são obtidos pela dispersão do polímero em um líquido, a partir da polimerização em emulsão de compostos insaturados polimerizáveis (Matos, 2015). Essa técnica da polimerização em emulsão é a mais utilizada para produzir as emulsões poliméricas em escala industrial.

Os pesos moleculares dos polímeros preparados por polimerização em emulsão são geralmente elevados (Mark, 2013). Ainda segundo o autor, os látices acrílicos são usados para tintas externas devido à sua resistência à fotodegradação e sua estabilidade hidrolítica. As tintas látex acrílicas são úteis para substratos alcalinos, como por exemplo alvenaria e metal galvanizado. As resinas acrílicas são usadas como ligante primário em uma ampla variedade de revestimentos industriais.

Os látices acrílicos (ou emulsões acrílicas) são aquosos, ou seja, o solvente orgânico nas emulsões é substituído por água, contribuindo para uma menor capacidade poluidora do ambiente. Ainda apresentam algumas vantagens como seu custo e facilidade de polimerização (Fazenda, 2009). Os polímeros acrílicos, compostos por acrilatos e metacrilatos, desempenham um papel essencial em diversas aplicações industriais devido às suas propriedades mecânicas, ópticas e químicas. Sua versatilidade, transparência, durabilidade e resistência às intempéries fazem com que sejam amplamente utilizados em setores como tintas, revestimentos, adesivos, têxteis e construção. A síntese desses polímeros pode ser realizada por meio de diferentes técnicas de polimerização, incluindo processos em massa e em solução (Solera-Sendra *et al.*, 2025)

Em uma emulsão, a menor unidade é uma partícula, sendo formada por um grande número de moléculas poliméricas e que está “solubilizada” por uma superfície com emulsionantes para proporcionar estabilidade. Alguns monômeros que são utilizados para obter polímeros em emulsão são: acetato de vinila, cloreto

de vinila, ácido acrílico e seus ésteres (acrilatos), ácido metacrílico e seus ésteres (metacrilatos), entre outros (Fazenda, 2009). A polimerização em emulsão é um processo de fácil controle, e a emulsão apresenta baixa viscosidade, mesmo com altos pesos moleculares. O autor afirma que, em muitos casos, na polimerização em emulsão o peso molecular, a velocidade da reação e a viscosidade são independentes entre si.

A indústria da construção civil, em constante crescimento e aperfeiçoamento, busca constantemente alternativas de baixo impacto ambiental. As tintas de base aquosa, as quais utilizam látices poliméricos em sua formulação, tem sua utilização potencializada devido ao uso de produtos e tecnologias ambientalmente amigáveis, ocasionando baixo consumo de energia e menor formação de resíduos (Silva e Souza, 2009).

#### **4.6 Nanocompósitos**

Um nanocompósito é um material composto por uma matriz de base polimérica, metálica ou cerâmica incorporada com nanocargas dispersas, ou seja, na escala nanométrica e com propriedades únicas devido a diferenças na estrutura e na química. O aprimoramento das propriedades está diretamente relacionado à ampla área interfacial e à elevada razão de aspecto das nanoestruturas presentes no sistema (Matos *et al.*, 2017), onde a introdução dessas nanocargas confere ao compósito propriedades superiores às do material base, como maior resistência mecânica, melhor desempenho térmico, aumento da barreira à difusão de gases, condutividade elétrica ou propriedades antimicrobianas, dependendo da natureza dos reforços utilizados (Rane *et al.*, 2018). Essa sinergia entre a matriz e os nanomateriais permite o desenvolvimento de materiais multifuncionais com aplicações em diversas áreas, incluindo construção civil, indústria automotiva, embalagens, dispositivos eletrônicos e biomateriais.

Nanomateriais à base de carbono quando utilizados como reforços em nanocompósitos de matriz polimérica apresentaram melhorias interessantes de algumas propriedades, dentre elas mecânicas e térmicas (Naidek, 2019). Conforme Fu *et al.* (2019), os polímeros possuem algumas limitações que podem ser superados pela utilização desses reforços. Segundo os autores, os nanomateriais

possuem maior área superficial, o que possibilita, através de uma alta área de contato interfacial com esses polímeros, que suas propriedades físicas e mecânicas sejam otimizadas.

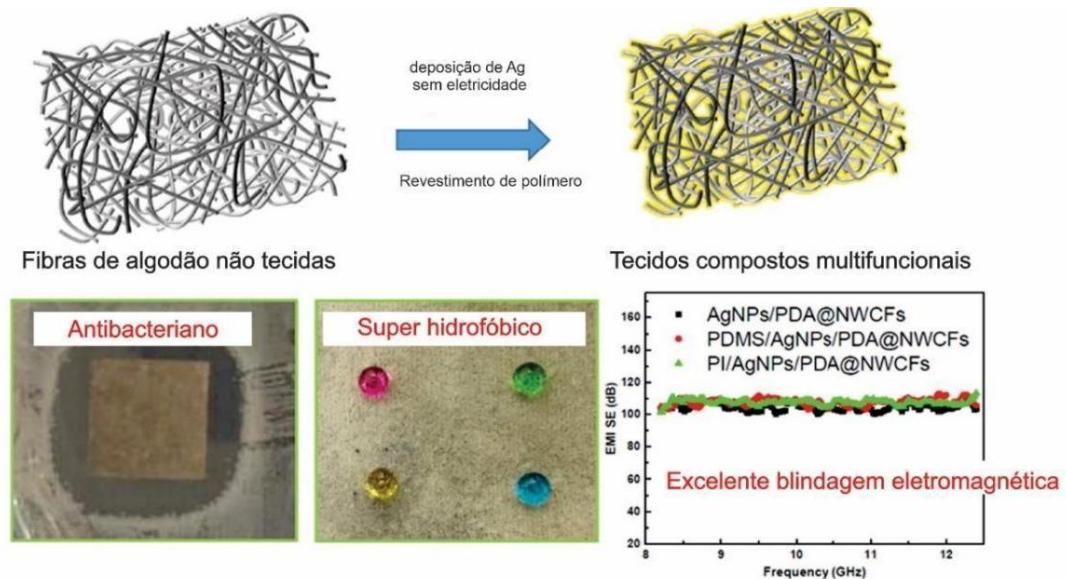
Bokobza (2017) observou em seu trabalho um aprimoramento na rigidez das matrizes poliméricas quando reforçadas com nanomateriais de carbono, comparado a reforços com negro de fumo. Ainda, descreve que as propriedades estão relacionadas a fatores como dispersão dessa carga, e que reduzidas quantidades dessa são suficientes para possibilitar condução elétrica.

Matos, Galembeck e Zarbin (2017) utilizaram quatro variações de nanoestruturas de carbono associados ao látex de borracha natural, sendo elas: nanografite, NTC, GO e rGO, avaliando suas propriedades de multifuncionalidade. Empregando apenas 2% em massa de cada nanoestrutura, os autores caracterizaram por várias técnicas, observando a boa dispersão, aderência e a multifuncionalidade dos nanocompósitos. Ainda, concluíram que as alterações têm relação com a morfologia e características da estrutura dos nanomateriais utilizados.

GO como alternativa de surfactante em polímeros foi estudado por Matos *et al.* (2019), onde foram apresentados os efeitos na estrutura eletrônica, entre outros, comprovando que este material pode ser uma alternativa em polímeros para uma maior interação entre os componentes dos nanocompósitos.

Ainda, AgNPs utilizadas em combinação com polímeros podem resultar em propriedades interessantes. Gao *et al.* (2021) em seu trabalho mostraram que tecidos de algodão revestidos com AgNPs utilizando polidomanina (para fixação) e polidimetilsiloxano hidrofóbico ou poliimida apresentaram proteção contra interferência eletromagnética (EMI) ultra alta, propriedades super hidrofóbicas e antibacterianas. Na Figura 7 abaixo está exemplificado o resumo gráfico da proposta dos autores.

Figura 7: AgNPs incorporadas em tecido



Fonte: Adaptado de Gao et al (2021)

Perante o exposto, AgNPs e GO são materiais promissores para aplicações como cargas de reforço em matrizes poliméricas, justificados pelas suas excelentes propriedades comprovadas tanto nos materiais isolados – função bactericida nas AgNPs e mecânicas, hidrofóbicas e térmicas no GO, como quando utilizados como reforço. É possível também a utilização dos dois nanomateriais (AgNPs e GO) combinados.

#### **4.7 Estado da arte - Utilização de nanopartículas de prata e óxido de grafeno em materiais nanocompósitos**

Segundo Lara *et al.* (2011), os nanomateriais antimicrobianos, nos quais enquadram-se, entre outros, a prata e os nanotubos de carbono, são vantajosos pelas suas propriedades físico-químicas, assim como suas altas áreas de superfície. Talarska, Boruckowski e Żurawski (2021) em seu trabalho apresentam os conhecimentos recentes acerca da utilização de nanopartículas de prata e ouro em diversas aplicações, mostrando a influência das variáveis como tamanho, concentração, tipo de revestimento, entre outros, nos efeitos tóxicos das nanopartículas.

Nanocompósitos híbridos à base de quitosana-curcumina, óxido de grafeno e óxido de cobre foram estudados para aplicações antibacterianas e citotóxicas. No estudo de Sanmugam *et al.* (2024), os nanocompósitos foram caracterizados por diversas técnicas avançadas, demonstrando propriedades físico-químicas aprimoradas. Os testes *in vitro* indicaram que o material apresentou liberação controlada de fármacos e alta eficácia contra *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli*, nesta em especial o nanocompósito híbrido CS-CUR-GO/CuO.

De acordo com as análises do trabalho de Naser *et al.* (2025), no qual apresentam uma síntese verde de um nanocompósito inovador composto por quitosana, GO e AgNPs (CS-GO-AgNPs), utilizando ablação a laser pulsado, a interação sinérgica entre os componentes exibiu forte atividade antibacteriana contra bactérias Gram-positivas e Gram-negativas, melhores do que seus componentes isolados. Pode-se observar uma disruptão da membrana celular bacteriana, assim como o estresse oxidativo. O GO atua como um disruptor físico interagindo com membranas celulares microbianas, causando ruptura da membrana ou a formação de poros, levando à morte celular.

O trabalho de Durairaj *et al.* (2024) demonstra os efeitos bactericidas e citotóxicos dos nanocompósitos de GO e prata (GO/Ag). Os pesquisadores sintetizaram diferentes variações do material e avaliaram sua eficácia contra bactérias Gram-positivas (*S. aureus* e *B. subtilis*) e Gram-negativas (*E. coli* e *S. enterica*). Os resultados indicaram que os nanocompósitos apresentaram forte atividade antimicrobiana, com concentrações mínimas inibitórias (MIC) de 62,5 µg/mL para bactérias Gram-positivas e 125 µg/mL para Gram-negativas.

Das e colaboradores (2011), estudaram a síntese de AgNPs por redução química em uma suspensão de GO, mostrando as nanopartículas decoradas nas folhas. A escolha do GO como matriz, por ele ser um material em camadas, pode induzir as interações que geralmente faltam em nanopartículas de Ag isoladamente e, assim, aumentar sua atividade antimicrobiana. O tamanho e a forma das nanopartículas são dependentes da concentração da solução de AgNO<sub>3</sub>.

De Faria *et al.* (2014), apresentam um nanocompósito formado por folhas de GO decoradas com AgNPs, demonstrando a eficiente atividade antibacteriana. A síntese utilizou AgNO<sub>3</sub> e citrato de sódio como agente estabilizador. O modelo

químico proposto para explicar a nucleação das nanopartículas de Ag está relacionado à interação dos íons Ag<sup>+</sup> com os grupos carboxílicos na superfície do GO.

Nano-híbridos antimicrobianos são utilizados como alternativa em função de suas propriedades sinérgicas. Cobos *et al.* (2020) apresentaram uma rota ambientalmente amigável para a síntese de GO decorado com AgNPs (GO-AgNPs), na qual as nanopartículas geradas são distribuídas homogeneamente na superfície do GO, esse parcialmente reduzido, utilizando apenas ácido ascórbico como agente redutor e AgNO<sub>3</sub> como precursor de metal, sem a presença de agente estabilizador. Jaworski *et al.* (2018) prepararam um nanocompósito de GO com AgNPs em sua superfície, com características antifúngicas e antimicrobianas eficientes em relação a bactérias e células de levedura.

Pesquisas recentes investigaram a síntese verde de nanocompósitos de GO combinados com AgNPs, óxido de cobalto (Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) e óxido de zinco (ZnO) para aplicações antimicrobianas multifuncionais. Os materiais foram sintetizados utilizando *Moringa oleifera* como agente redutor, garantindo um processo sustentável. O nanocompósito ZnO/GO apresentou a maior eficácia contra cinco bactérias Gram-positivas, onze cepas Gram-negativas e seis fungos filamentosos (Manzar *et al.*, 2025).

Tran *et al.* (2025) apresentam em seu trabalho a incorporação de nanocompósitos de quitosana, GO e AgNPs em filmes de álcool polivinílico (PVA) para aplicações em embalagens biodegradáveis de frutas, com a finalidade de desenvolver um material multifuncional com propriedades antibacterianas, bloqueio UV e resistência mecânica aprimorada. O filme demonstrou excelente eficácia contra *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus*, com zonas de inibição de 10,09 mm e 12,66 mm, respectivamente, resultantes do efeito sinérgico da combinação de GO e AgNPs. Ainda, o material protegeu frutas expostas à luz UV por 10 dias, retardando o amadurecimento e prevenindo o crescimento microbiano.

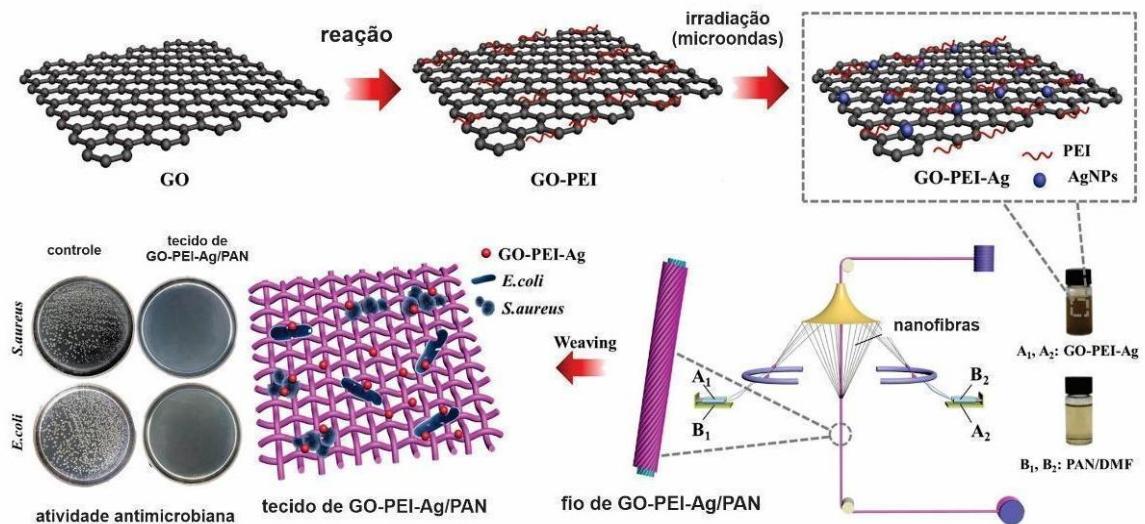
Estudos apontam nanocompósitos mistos de GO e AgNPs utilizados em atividades antibacterianas em revestimentos têxteis médicos (Lange *et al.*, 2022). Os resultados apontam uma otimização do efeito antibacteriano do compósito quando comparado ao efeito da AgNPs simples, mostrando que quando as células bacterianas são tratadas com o nanocompósito, ocorre além do ponto de interação básico, levando ao rompimento da membrana celular microbiana. Ainda contribuem

para a morte celular o estresse oxidativo e a peroxidação lipídica, caracterizando assim o GO como uma base funcional para as AgNPs, melhorando essas propriedades.

Crane, Devine e Jamieson (2021) testaram propriedades antivirais *in vitro* de materiais compósitos de nanopartículas de GO e prata, contra Influenza A e Coronavírus OC43, em três diferentes métodos. Os autores realizaram ensaios de placa viral após a exposição dos vírus a cada material, onde os materiais de nanopartículas de GO– prata gerados pela adição direta das nanoesferas de prata inibiram a formação de placas por ambos os vírus com apenas um minuto de exposição.

Yu *et al.* (2021) desenvolveram uma pesquisa sobre a atividade antibacteriana de nanocompósitos de GO e prata, incorporados em tecidos, visto que têxteis tradicionais apresentam limitações como a baixa durabilidade antibacteriana. O trabalho utilizou para o desenvolvimento do material a tecnologia da eletrofiação, e o GO foi funcionalizado com polietilenoimina (PEI), nominando o compósito GO-PEI-Ag, conseguindo um resultado de mais de 99,9% de eficiência contra *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus* (Figura 8).

Figura 8: Processo de desenvolvimento do nanocompósito e atividade antimicrobiana



Fonte: Adaptado de Yu *et al.* (2021)

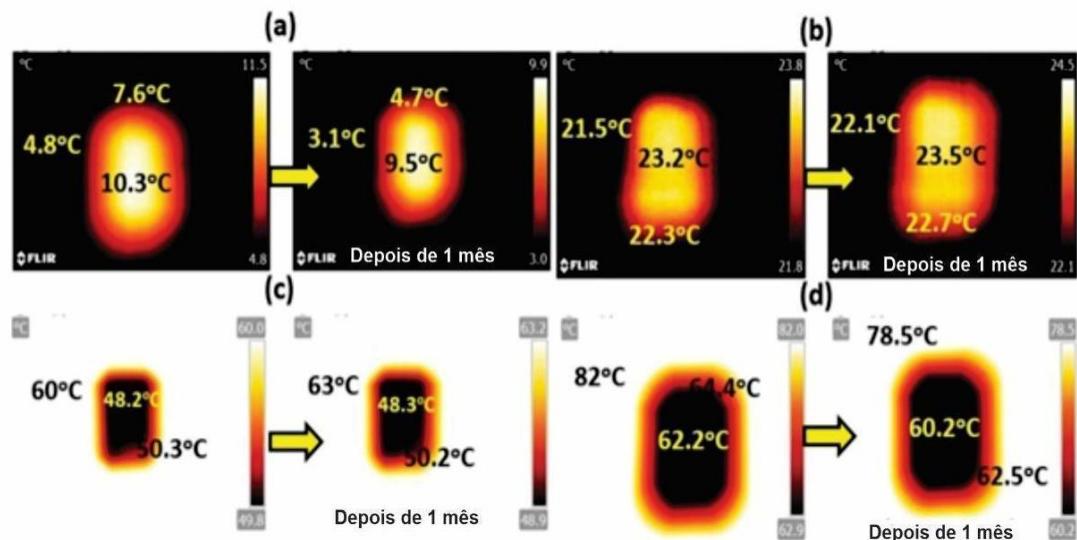
Tintas para revestimento de superfícies utilizando nanomateriais para otimizar suas características de proteção antibacteriana estão em ritmo avançado nas pesquisas. Arun *et al.* (2019) desenvolveram uma tinta de GO magnético (MGO), incorporando ferrita de cobalto (CF) e GO juntamente com materiais de pintura usando moagem de bolas de alta energia (HEBM), mostrando resultados considerados excelentes em relação à eficácia antibacteriana.

Ainda em se tratando da construção civil, cada vez mais edificações consomem energia em excesso, devido à necessidade constante de sistemas de aquecimento e resfriamento, para controle do desconforto térmico. Nessa esteira, Roy *et al.* (2021) desenvolveram um estudo com um revestimento flexível utilizando GO, implementando como absorvedor térmico em edificações, para melhoria do conforto térmico. A montagem consistiu em uma camada de GO no topo de um substrato à base de vidro (ou alumínio), e entre eles um material que muda de fase em contato com a exposição direta do sol. O revestimento GO apresenta a função de manter a temperatura interna alta enquanto a externa é baixa. Considerando a temperatura ambiente, os resultados mostraram que a diferença não foi significativa, aumentando essa diferença de temperatura em caso de maior temperatura exterior aplicada. Ainda, os autores provaram, pelas imagens térmicas, que o GO é um candidato promissor para auxiliar na melhoria do conforto térmico, pois a presença desse nanomaterial neste experimento como camada superficial mostrou possibilidade de ambientes internos mais confortáveis tanto quando a temperatura externa está mais fria ou mais quente. Tal fenômeno é atribuído a fatores como a propriedade de condução de calor horizontal com alta estabilidade térmica como revestimento.

A Figura 9 abaixo apresenta as análises de imagens térmicas do material desenvolvido. A maior eficiência se dá com maior intensidade de diferença de temperatura, como pode-se verificar nas imagens a, c e d. Os ensaios de espectroscopia Raman indicam que o aumento da temperatura eleva a razão entre as intensidades das bandas D e G (ID/IG), o que sugere um maior grau de grafitização. Essa razão avalia o nível de desordem estrutural e a proporção entre átomos de carbono  $sp^3$  (defeituosos) e  $sp^2$  (grafíticos). Segundo os autores, com a alta temperatura, ocorre uma ampliação significativa das regiões grafíticas (carbono  $sp^2$ ). Além disso, a recombinação das camadas de grafeno em altas temperaturas promove a formação de domínios grafíticos, mesmo com desordem entre si. Isso

pode ser interpretado como a criação de camadas grafíticas combinadas, porém com distribuição desordenada.

Figura 9: Análise de imagem térmica IR (infravermelho) das amostras aplicadas em (a) temperatura mais baixa ( $4^{\circ}\text{C}$ ), (b) temperatura ambiente ( $22^{\circ}\text{C}$ ), (c) temperatura alta ( $60^{\circ}\text{C}$ ) e (d) temperatura muito alta ( $80^{\circ}\text{C}$ ). Registro instantâneo e após um mês.



Fonte: Adaptado de Roy et al (2021)

Os autores sugerem que o GO atua como condutor térmico eficiente devido à sua estrutura eletrônica bidimensional plana, que favorece o transporte de calor ao longo do plano. Essa condutividade térmica é especialmente elevada até certo comprimento de canal, além do qual pode ocorrer dispersão de fônonos (portadores de calor). Adicionalmente, a presença de poros e defeitos estruturais no GO permite que o calor gerado seja dissipado mais rapidamente para o ambiente externo, funcionando como uma via auxiliar de resfriamento térmico.

Nota-se com esse trabalho, o avanço nas pesquisas e a emergente necessidade de alternativas para conforto térmico nos espaços novos e existentes da construção civil, em especial nas moradias. Conforme observado alguns revestimentos que podem auxiliar e estão em constante pesquisa para aprimoramento são os revestimentos otimizados através das tintas).

## 4.8 Tintas

Tinta é uma composição líquida, em geral viscosa, constituída de um (ou mais) pigmentos dispersos em um aglomerante líquido. Após o processo de cura, forma-se um filme aderente ao substrato, com a finalidade estética e de proteção às superfícies (Fazenda, 2009).

De acordo com Barrios (2017), os componentes básicos das tintas podem ser agrupados em quatro diferentes grupos, de acordo com a sua finalidade no sistema. Abaixo, na Tabela 2 são ilustradas as categorias, seus materiais e principais características:

Tabela 2 – Componentes básicos das tintas

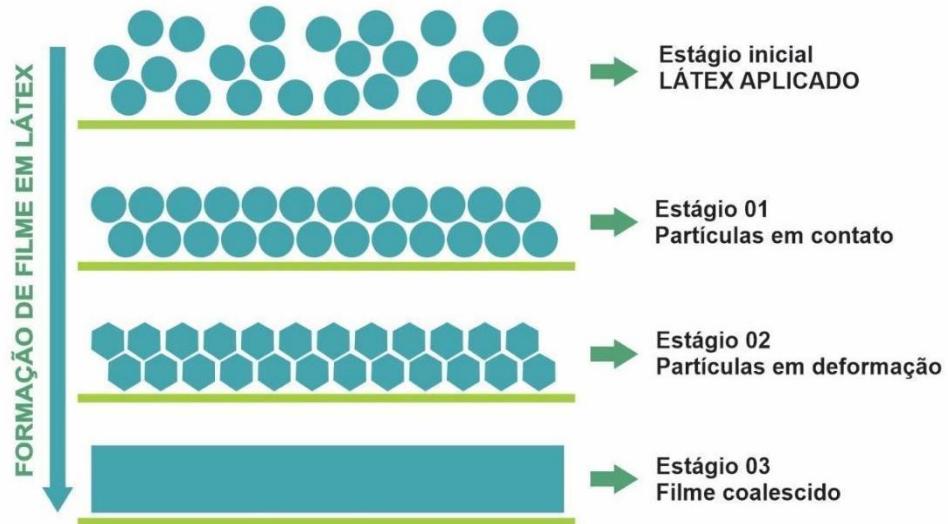
<b>Formadores de filme - Látex, resinas e endurecedores</b>	São componentes poliméricos que agregam e mantêm coeso o restante do sistema; São a parte ativa do revestimento, sendo comercializados em base pura ou diluída; Podem ser apresentados em sistemas para aplicação de monocomponentes e bicomponentes.
<b>Componentes voláteis - solventes e coalescentes</b>	Permitem aplicar a parte ativa do revestimento na forma líquida e abandonam o sistema evaporando após a aplicação; Reduzem a viscosidade do sistema.
<b>Componentes insolúveis - pigmentos e cargas</b>	Os pigmentos conferem cor e poder de cobertura; As cargas controlam propriedades como brilho, viscosidade, entre outras, mas não conferem poder de cobertura.
<b>Aditivos</b>	São adicionados em pequenas quantidades (abaixo de 5% m/m) para modificar propriedades específicas. Podem ser moléculas simples ou polímeros orgânicos ou inorgânicos, solúveis ou não no meio.

Fonte: Adaptado de Barrios (2017).

A formação de um filme se dá por diversas formas, uma delas pela dissolução de um polímero em um solvente, em determinada concentração, e após a evaporação do solvente até a formação do filme contínuo e sólido; tendo os estágios da aplicação, fixação e secagem (Indovinya, 2020). Outra forma de formação de filmes é por coalescência das partículas poliméricas, onde as dispersões dessas partículas em água dependem de um mecanismo que envolve

a coalescência destas durante a evaporação da água. Essas dispersões de polímero em água são chamadas de látex, obtidas por polimerização de monômeros acrílicos ou vinílicos em emulsão, conforme já mencionado anteriormente. O látex, ao ser aplicado em uma superfície, após a evaporação da água, proporciona a formação do filme contínuo e homogêneo, dependendo das condições de umidade e temperatura (Barrios, 2017). A Figura 10 abaixo ilustra a morfologia das partículas poliméricas em processo de formação de filme de látex.

Figura 10 – Formação do filme em látex



Fonte: Adaptado de Barrios (2017)

É preciso atentar aos aspectos reológicos da tinta, que são relacionados à deformação e fluxo da matéria (Jesus, 2000). Existem três tipos de deformação: a elástica, que é reversível, a não elástica, irreversível, e a viscoelástica. Para isso, são utilizados aditivos como espessantes, ou modificadores reológicos para ajustes da viscosidade da tinta.

#### 4.8.1 Tintas com propriedades antibacterianas

O crescimento microbiano nas edificações é um problema a ser investigado, pois esses microrganismos, pertencentes a diferentes grupos, colonizam as superfícies. Além da higiene, a vida útil e a estética do edifício são prejudicadas.

Ganguli e Chaudhuri (2021) em sua revisão sobre os nanomateriais aplicados em tintas e revestimentos antimicrobianos como prevenção da deterioração de edifícios e monumentos, apontam que nanoadditivos, como a prata, possuem vantagens quando comparados aos biocidas tradicionais. O artigo traz um levantamento dos artigos de pesquisa na literatura, em um período aproximado de 10 anos, das aplicações dos nanomateriais mais utilizados.

AgNPs impregnadas em tintas como agentes antimicrobianos têm sido alvo de estudos recentes (Khaydarov, 2011; Garipov, 2019), assim como a composição entre essas nanopartículas e GO reduzido, com o objetivo de otimizar as propriedades antibacterianas que os materiais já possuem individualmente, produzindo alta eficácia contra três patógenos testados no estudo (Prasad, 2017).

Robak e Koźlecki (2019) apontam a questão da invasão microbiana em materiais de construção, como as tintas, como um problema a ser tratado, e ressaltam a importância de materiais protegidos para manter a saúde humana. Em seu estudo comprovaram a atividade biocida das AgNPs na concentração de 6,25 mg/L, destacando como uma metodologia onde a suspensão pode ser aplicada através da mistura com as tintas em edificações.

Saravia *et al.* (2020) estudaram a atividade antibacteriana e antiaderente de compósitos de nanopartículas de GO-prata, visando aplicações em revestimentos como tintas para evitar a formação de um biofilme bacteriano. A pesquisa concluiu que o método de síntese dos nanomateriais alterou nos resultados quanto à eficiência antibacteriana.

#### **4.8.2 Tintas térmicas**

Devido ao aquecimento global e a extensa demanda da utilização de resfriamento ativo, soluções para resfriamento passivo ganham espaço nas pesquisas recentes (Suwal *et al.*, 2022). A redução do consumo de energia é de grande relevância para o cenário energético mundial, no que se refere à demanda de utilização dos combustíveis fósseis (Khitab *et al.*, 2022).

Pesquisas a respeito de tintas para revestimento de paredes/tetos nas edificações para controle térmico vêm sendo desenvolvidas, apresentando resultados interessantes. Khitab *et al.* (2022) apresentam em sua pesquisa um panorama das estratégias de isolamento térmico utilizando a nanotecnologia e os

nanomateriais, em edificações energeticamente eficientes, apontando que os nanomateriais, pelas suas características microscópicas, apresentam eficiência na questão do isolamento, tendo como alguns exemplos os materiais de mudança de fase, aerogéis, entre outros.

Alguns autores que utilizam os materiais de mudança de fase (do inglês *phase change materials* - PCMs) para armazenamento de energia térmica são Nazari e colaboradores (2021). Os pesquisadores revisaram sobre dispersões de nanomateriais sólidos condutores para melhorar características térmicas e otimizar a capacidade de armazenamento ou não de calor, fazendo uma abordagem sobre a aplicação da nanotecnologia em PCMs. Os autores ainda afirmam que, de acordo com os resultados, a melhoria do desempenho térmico está associada, dentre outros fatores, ao aumento da condutividade térmica. Ainda, Naikwadi, Samui e Mahanwar (2021) também utilizam material de mudança de fase nano/micro encapsulado em preparação de tintas decorativas para armazenamento de energia térmica.

O trabalho de An *et al.* (2021) aponta algumas propriedades buscadas para os revestimentos de tinta como alto isolamento térmico, refletância de luz, durabilidade mecânica e resistência ao desgaste. Tais autores preparam um nanocompósito com potencial aplicação como isolante térmico, de base aquosa, utilizando aerogel de sílica mesoporosa e tinta com nanopartículas de titânia. O composto apresentou baixa condutividade térmica (0,029 w/mK), alta refletância e módulo de Young de 4,86 MPa, além de hidrofobicidade e alta resistência à abrasão.

Ainda em relação à eficiência energética das edificações, Alfarawi *et al.* (2022) realizaram um estudo em edificações residenciais líbias utilizando diferentes técnicas com o objetivo de reduzir a transmitância térmica das estruturas tradicionais de vedação, como blindagem, enchimento isolante e isolamento externo (EPS), o qual apresentou melhor resultado (redução da transmitância térmica em 45%). De outra forma, Chihab (2022) estuda a incorporação de três medidas passivas para melhorar o conforto nas edificações marroquinas, revestindo as paredes internas dos tijolos de barro, e concluíram que revestindo as superfícies internas desses tijolos com tinta de baixa emissividade, e ainda preencher cavidades com materiais isolantes ou PCMs aumenta a inércia térmica desses tijolos de argila.

Suwal *et al.* (2022), a respeito do resfriamento passivo, desenvolveram três formulações de tinta para telhados, à base de água, utilizando materiais isolantes de calor e reflexivos, estudando seu desempenho térmico. Os autores utilizaram aglutinante acrílico preparado por polimerização em emulsão, pigmentos de mica, dióxido de titânio e óxido de ferro. Os resultados mostraram uma redução de temperatura de superfícies externas e internas de 5,2°C e 5,9 °C, e da temperatura ambiente interna de 2,8°C. Com base no exposto, concluíram que esses materiais possuem potencialidades para aplicação em resfriamento passivo aplicados em telhado, combatendo assim o calor extremo e diminuindo a necessidade de condicionamento artificial. Ainda, o trabalho de Lu *et al.* (2022) através da fabricação sustentável de pó de aerogel de sílica, material hidrofóbico, de baixa condutividade térmica e alta área superficial, misturado em tintas à base de água apresentou resultados eficientes de isolamento térmico e resistência à água.

Uma das limitações dos compósitos utilizados como revestimentos em áreas expostas é a resistência às intempéries. Óxido de grafeno reduzido foi estudado no trabalho de Yari *et al.* (2021) para modificar uma matriz de poliuretano (PU) com o objetivo de otimizar a sua resistência à intempérie e radiação solar. Foi utilizada uma rota verde utilizando folhas de urtiga e hidrazina para reduzir o GO. O material apresentou bons resultados quanto à elevação da estabilidade ao intemperismo.

Segundo Novo *et al.* (2014), para aumentar a probabilidade de atingir uma maior emissão de calor, na formulação da tinta deve-se combinar dois ou mais materiais de alto poder emissivo e que absorvam diferentes comprimentos de onda. Ainda, a espessura e rugosidade da camada aplicada são aspectos importantes para aumentar a emissividade e assim, ajudar na conservação de energia.

Alguns trabalhos avaliam o impacto da envoltória das edificações no consumo de energia baseados em programas computacionais (Yu *et al.*, 2015). Um dos mais utilizados é o software *EnergyPlus*. Outras pesquisas utilizam uma técnica para avaliação do desempenho do envelope térmico das edificações, que são as câmeras termográficas.

Muitos trabalhos utilizam a termografia para diversos fins, entre eles a investigação da fissuração em fachadas (Silva e Bauer, 2024), análise de manifestações patológicas em edificações (Abreu e Silva, 2024), análise da eficiência energética de edifícios (Aldana-Rodríguez e Lozano-Tafur, 2023), auxílio no diagnóstico do estado de conservação do patrimônio edificado, através do

levantamento de dados (Innocencio *et al.*, 2021), análise de problemas relacionados ao ar-condicionado (Madrigal *et al.*, 2018), inspeção termográfica em edifícios para análise do estado de conservação da estrutura física e o comportamento térmico da edificação (Altoé e Oliveira Filho, 2012), detecção de infiltração em áreas internas de edificações (Rocha *et. al*, 2018), entre outros. A Figura 11 abaixo exemplifica a utilização da termografia em uma análise de manifestação patológica, onde pode-se observar, pela escala de cores, as diferenças de temperatura em uma mesma parede.

Figura 11: Comportamento térmico medido em uma parede



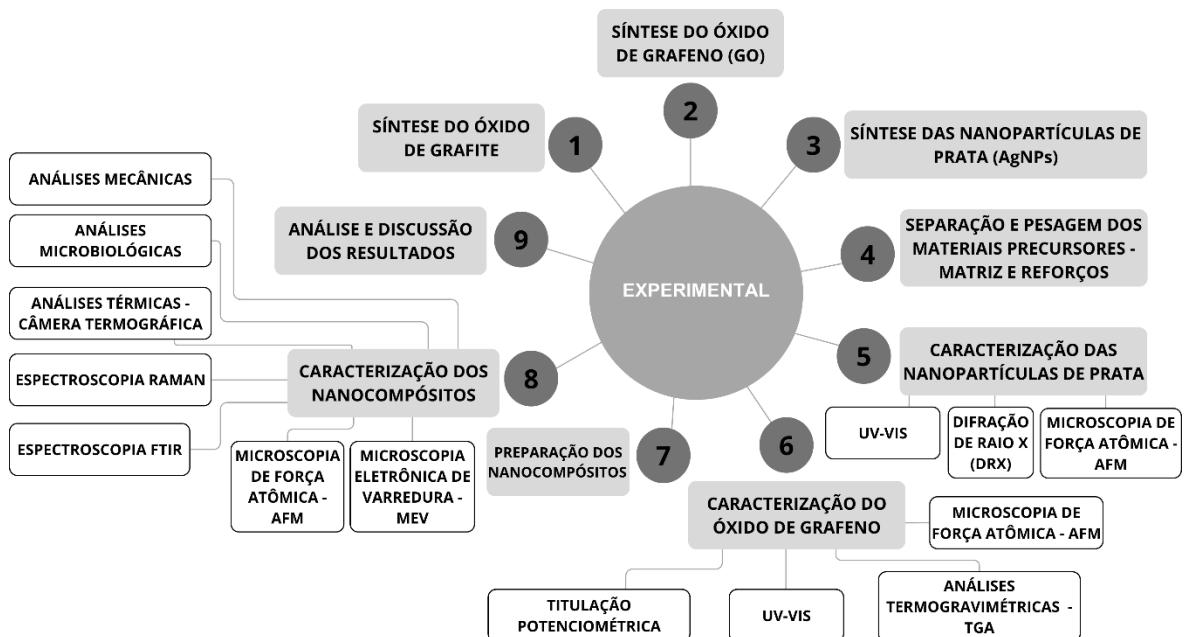
Fonte: Abreu e Silva (2024)

O trabalho de Rodriguez, Melgar e Márquez (2024) utilizou o método da termografia aérea para a avaliação da distribuição da temperatura nas superfícies das fachadas de edifícios. Segundo os autores, as estratégias para aprimorar o envelope do edifício são analisadas considerando a transferência de calor através de seus componentes. Composto por paredes de fachada, janelas e telhado, o envelope atua como uma barreira entre o ambiente interno e externo, protegendo o espaço habitável contra fatores climáticos como vento, chuva e radiação solar. A termografia infravermelha é amplamente empregada na construção civil para analisar o desempenho térmico do envelope do edifício. Essa tecnologia facilita a identificação de falhas térmicas e a estimativa do valor U, permitindo uma avaliação precisa da eficiência energética da estrutura.

## 5 Metodologia

Neste capítulo, é descrito o método adotado para o desenvolvimento das amostras, juntamente com as técnicas experimentais utilizadas para análise e caracterização. O fluxograma apresentado na Figura 12 ilustra, em ordem sequencial, todas as etapas do processo experimental desta pesquisa.

Figura 12: Fluxograma da pesquisa



Fonte: A autora (2025)

### 5.1 Primeira etapa: Aquisição/síntese dos materiais precursores

#### 5.1.1 Síntese do Óxido de Grafite (Gr-O)

O Gr-O utilizado foi obtido pela oxidação química do grafite (Matos, 2015). Em um balão volumétrico (500 mL), 1 g de grafite (Sigma-Aldrich) foi adicionado a 60 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado. O balão foi mantido em banho de gelo e leve agitação por 15 minutos. Na sequência, foram adicionados 3,5 g de KMnO<sub>4</sub>, de forma lenta e contínua. Após o procedimento, a mistura foi retirada do banho de gelo, e colocada para agitação magnética em 120 minutos. Na sequência, o balão foi colocado em banho de gelo, e foram lentamente adicionados 200 mL de água

destilada. Após 10 minutos sob agitação, 3 mL de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (peróxido de hidrogênio) 30% foram acrescentados. Após o material sólido decantar, o sobrenadante foi descartado. O Gr-O resultante foi lavado com 500 mL de água destilada, 250 mL de HCl 10%, 250 mL de acetona, 500 mL de etanol e mais 1000 mL de água destilada, divididos em 2 momentos. Após o procedimento, 500 mL de água destilada foram acrescentados, e o material foi armazenado resfriado em frasco âmbar.

### **5.1.2 Síntese do Óxido de Grafeno (GO)**

O GO foi obtido a partir do Gr-O sintetizado anteriormente. A dispersão foi esfoliada em ultrassom de ponta (marca ECOSONICS, potência de 350 Watts, operando com 30% da mesma, com uma microponteira), no tempo de 20 minutos. A concentração medida foi de 1,44 mg de GO por mL.

Esta concentração foi calculada a partir da fórmula desenvolvida por Matos (2017), para a síntese de GO utilizada, em solução.

### **5.1.3 Síntese das Nanopartículas de Prata (AgNPs)**

As AgNPs foram sintetizadas através da redução de íons prata utilizando como precursor o nitrato de prata (AgNO<sub>3</sub>), por borohidreto de sódio (NaBH<sub>4</sub>), e inicialmente estabilizadas por citrato, baseados no método descrito por Jana *et al.* (Pinto, 2010). Para a obtenção dos nanocompósitos, esta metodologia foi alterada, onde o estabilizante foi substituído por CTAB (brometo de cetiltrimetilamônio). Essa síntese foi realizada da seguinte maneira: 50 mL do surfactante CTAB (0,1%) foram adicionados a 50 mL de AgNO<sub>3</sub> (1 mmol) em um balão volumétrico e mantidos por 30 segundos em agitação e protegido da luz para manter a estabilidade, em temperatura ambiente ( $\pm 25^{\circ}\text{C}$ ). Em seguida foram acrescentados 3 mL de NaBH<sub>4</sub> (13 mmol). Agitou-se a solução por mais 2 minutos. Imediatamente a coloração foi modificada para amarelo claro (Figura 13).

Figura 13: Dispersão aquosa contendo AgNPs obtidas no trabalho



Fonte: A autora (2022)

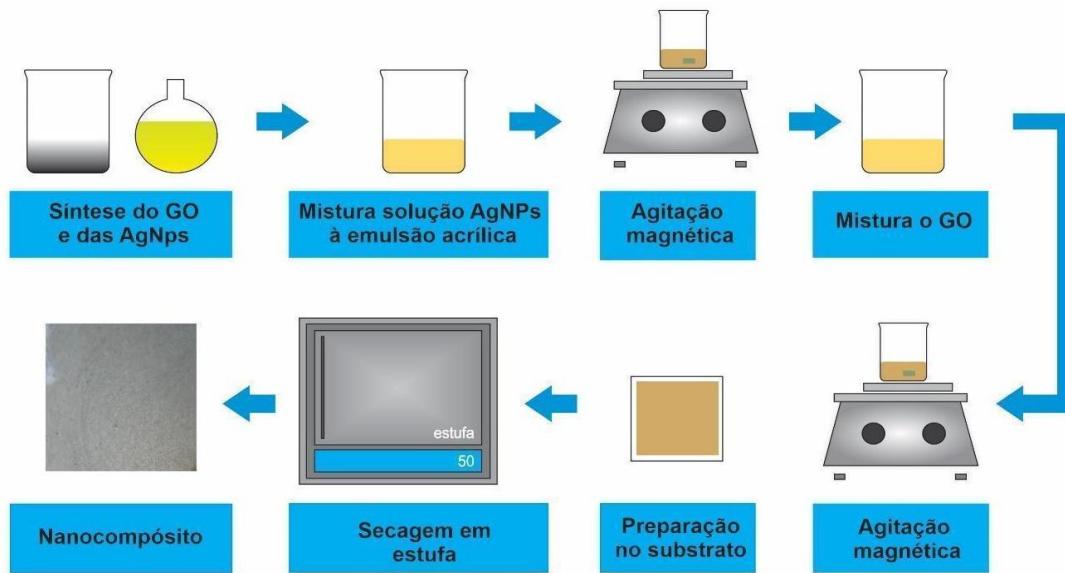
#### 5.1.4 Emulsão acrílica

A emulsão acrílica utilizada para a confecção das amostras foi cedida pela empresa Resycril, modelo Aracryl E-1967, com percentual de sólidos entre 49 e 51 %, pH entre 8 e 9 e densidade de 1,03 a 1,09 g/cm<sup>3</sup>.

#### 5.2 Segunda etapa: Preparação das amostras dos nanocompósitos

As primeiras amostras foram desenvolvidas utilizando a emulsão acrílica acima descrita como matriz, e como reforço foram utilizados o GO e as AgNPs, ambos sintetizados conforme descrição já mencionada. A confecção das primeiras amostras realizou-se no laboratório de química da Universidade Federal do Pampa – Campus Caçapava do Sul. A metodologia de preparo foi baseada no trabalho já desenvolvido no mestrado de minha autoria, no qual foram utilizadas rotas a partir da tecnologia do látex (método em solução) (Barasuol, 2021). Abaixo, na Figura 14, um esquema exemplificando a formulação dos nanocompósitos:

Figura 14: Rota de preparo dos nanocompósitos



Fonte: A autora (2022)

Após estudos para a otimização das formulações das amostras, foram definidas as proporções ideais dos componentes. Para o alcance de um filme com 500 micrômetros de espessura, no preparo das amostras controle e dos nanocompósitos foram utilizados em média 12 g de emulsão acrílica (6 g de massa seca / 50% de sólidos no látex). As condições experimentais que serão utilizadas estão na Tabela 3:

Tabela 3 – Proporções dos componentes utilizados nos nanocompósitos

TIPO	AgNPs (%)	SOLUÇÃO AgNP c/CTAB 0,1% (mL)	GO (%)	GO (mL)
<b>EAGO</b>	-	-	0,1%	4mL
<b>EAAgNPs</b>	0,01%	5,41mL	-	-
<b>02AgNP1GO</b>	0,002%	1,2mL	0,1%	4mL
<b>1AgNP1GO</b>	0,01%	5,41mL	0,1%	4mL
<b>2AgNP2GO</b>	0,02%	10,83mL	0,2%	8mL
<b>2AgNP2GOE</b> (com espessante)	0,02%	10,83mL	0,2%	8mL

As amostras são citadas no trabalho utilizando as siglas apresentadas na tabela acima, e mais as siglas abaixo que se referem ao controle, e às amostras com nanomateriais separados:

- **EA** é a sigla da amostra controle, com somente a emulsão acrílica pura e seca;
- **EAGO** é a sigla da amostra controle, com a emulsão acrílica e o GO;
- **EAAgNPs** é a sigla da amostra controle, com a emulsão acrílica e as AgNPs;
- **AgNP<sub>p</sub>GO** é a sigla das amostras preparadas com emulsão acrílica, AgNPs e GO, com as derivações abaixo:

O número que antecede a sigla **AgNp** representa o percentual em massa das AgNPs (com concentração 1mmol), e o número que antecede o GO (1 ou 2) representa a sua porcentagem em massa (0,1% ou 0,2%), conforme descrito na tabela acima. Por exemplo, 2AgNP2GO consiste no nanocompósito preparado com a emulsão acrílica, com percentual de 0,02% de **AgNPs** com concentração de 1mmol/L e utilizando 8 mL ou 0,2% de **GO**.

### **5.3 Terceira etapa: Caracterização dos materiais precursores – Nanopartículas de prata e óxido de grafeno**

#### **5.3.1 Análises químicas**

As AgNPs e o GO foram caracterizados por UV-Vis, em equipamento UV-VIS Kasuaki IL-593, e software UV Profissional, da Universidade Federal do Pampa – Campus Caçapava do Sul. Essa técnica analítica foi utilizada para identificar os compostos através da posição dos picos de absorção de luz em comprimentos de onda específicos, assim confirmando o sucesso das sínteses.

Para precisar a concentração de grupos carboxílicos no GO, foi realizada a titulação potenciométrica. À 25 mL da dispersão do GO ( $1,44 \text{ mg mL}^{-1}$ ) foi acrescentado NaNO<sub>3</sub>, como eletrólito de suporte, atingindo a concentração de 0,01 mol L<sup>-1</sup>. A combinação foi colocada no ultrassom durante 10 minutos. A mistura foi titulada com solução de NaOH 0,025 mol L<sup>-1</sup>, padronizada anteriormente com

biftalato de potássio. A alteração do pH foi visualizada no pHmetro (Hanna Instruments, modelo HI2221) e a faixa de pH para a realização dos ensaios foi de 2 a 12.

### **5.3.2 Análise estrutural**

A análise estrutural das AgNPs foi realizada por meio de análise de difração de raios X (DRX), utilizando um difratômetro Rigaku Miniflex® 300 equipado com ânodo de Cu ( $\lambda K\alpha 1 = 1,54051 \text{ \AA}$ ). Os parâmetros de varredura foram configurados com uma faixa de 10 a 80° e uma taxa de varredura de  $0,03^\circ \text{ s}^{-1}$ . O tamanho médio dos domínios cristalinos foi calculado pelo método de Scherrer (1918). As amostras foram liofilizadas. Estas análises foram realizadas na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

## **5.4 Caracterização dos nanocompósitos**

### **5.4.1 Análises morfológicas**

A fim de avaliar a microestrutura e rugosidade dos materiais obtidos, foi utilizado um microscópio de força atômica (AFM) em modo topografia. Também foi utilizado tal microscópio no modo contraste de fase, para avaliação de domínios mais duros e mais macios das amostras. Tais análises foram feitas no Laboratório do Grupo de Química de Materiais da Universidade Federal do Paraná (GQM – UFPR). As imagens - topografia e contraste de fase – foram realizadas no modo de não-contato, sob atmosfera de ar, com auxílio do microscópio SPM modelo 9700 – Shimadzu, em temperatura ambiente. Foram analisados o filme da tinta pura - matriz e a superfície dos nanocompósitos. Para a realização dos ensaios, as amostras foram depositadas com um conta-gotas em um substrato de vidro e colocadas para secagem.

Foram realizadas análises via microscopias eletrônicas de varredura (MEV) para avaliação da morfologia dos compósitos e da dispersão das cargas (GO e AgNPs) na matriz polimérica. Para tanto, foi utilizado um microscópio Jeol, JSM - 6610LV (equipado com detector de Espectroscopia de Energia Dispersa - EDS); e

um microscópio Jeol JSM - 6610LV. As análises foram realizadas nos materiais secos. Tais análises foram realizadas no CEME-SUL – Centro de Microscopia Eletrônica do Sul – FURG.

#### **5.4.2 Análises estruturais**

Foram realizadas as espectroscopias na região do Infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), para caracterização estrutural dos nanocompósito, para reconhecimento de grupos funcionais das amostras. Tais análises foram realizadas no Equipamento VERTEX Bruker – DQ/UFSM. Ainda, foram realizadas análises por espectroscopia Raman para observação das transições vibracionais e caracterização química dos componentes da amostra. Para isso, foi utilizado o equipamento Senterra Bruker- DQ/UFSM. A linha de excitação foi a de 532 nm.

#### **5.4.3 Análises mecânicas**

As análises mecânicas foram realizadas na Universidade Federal de Pelotas, no Laboratório de Pesquisa em Materiais (LPM), na Máquina Universal de Ensaios 1000 kgf marca BIOPDI, no modo tensão-deformação. O tipo de ensaio foi vertical positivo, com velocidade de 50mm/min. Todas as amostras foram padronizadas com 0,5 mm de espessura e comprimento útil de 40 mm. A força máxima aplicada foi de até 2 KN. Nas análises mecânicas foram utilizadas as amostras tipo filme, sem substrato. A norma técnica utilizada para os ensaios foi a ASTM D882, e foram realizadas em triplicata.

#### **5.4.4 Análise termográfica**

As câmeras termográficas, ou de imagens térmicas, são utilizadas para capturar radiação infravermelha emitida, e converter em imagens. O instrumento é capaz de detectar variações de temperatura em uma superfície, permitindo fazer análises térmicas com precisão (Figura 15).

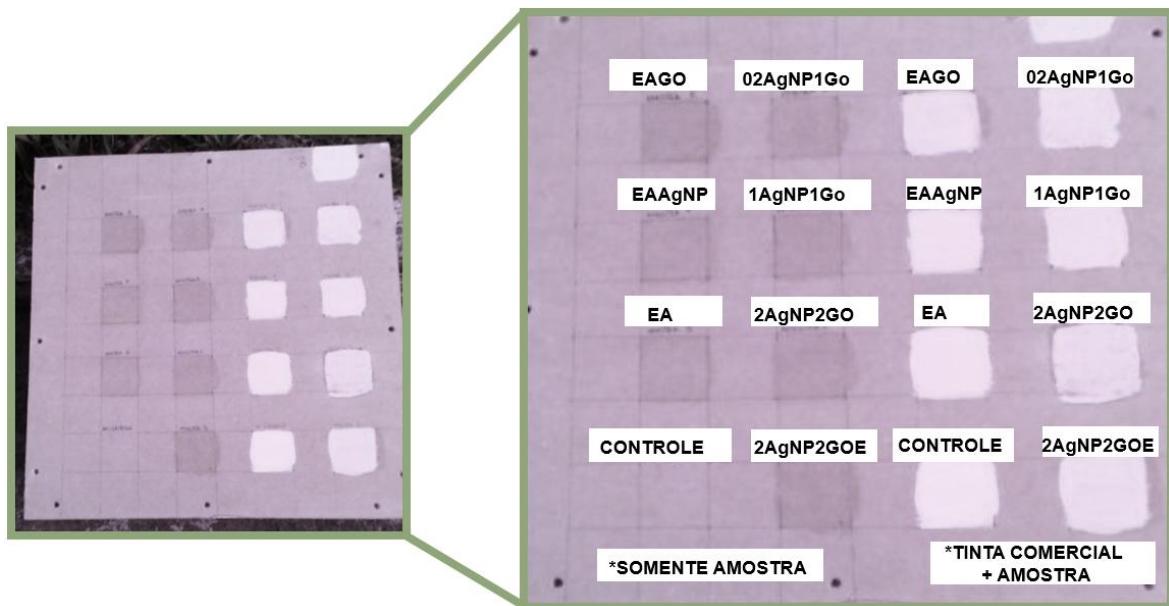
Figura 15: Exemplo de câmera termográfica



Fonte: [www.flir.com.br](http://www.flir.com.br)

Para a verificação da variação da temperatura nas superfícies em condições reais de exposição, foi realizada a análise termográfica, que permite verificar os padrões de temperatura em função da radiação emitida pela superfície. O objetivo foi realizar a verificação de forma não destrutiva e em tempo real do comportamento dos nanocompósitos em um substrato (placa cimentícia). A análise foi realizada no dia 15 de maio de 2025, no período da tarde, com sol direto e temperatura ambiente de 25°C, nas coordenadas geográficas de latitude -31,316° e longitude -54,107°. O substrato utilizado (placa cimentícia) foi colocado em suporte afastado 20 cm do chão, em direção ao Norte para melhor aproveitamento da radiação solar (Figura 16). Foram realizadas as análises termográficas nas amostras dos nanocompósitos e nas amostras de tinta branca comercial, pintadas diretamente no substrato, além das amostras com o nanocompósito sobre a tinta comercial. Todas as pinturas foram realizadas com 2 demãos cruzadas, e com intervalo de tempo de acordo com as orientações do fabricante da tinta comercial. O modelo de câmera utilizado foi o FLIR C5, da marca Teledyne FLIR, termovisor de 160 × 120 (19.200 pixels), Multi-Spectral Dynamic Imaging, câmera visual de 5 megapixels e lanterna LED. Precisão em temperatura ambiente de 15 a 35°C e temperatura do objeto acima de 0°C, 0 a 100°C: ±3°C, 100 a 400°C: ± 3°C. Os parâmetros utilizados foram: Emissividade de 0.95, reflexão de temperatura 20°C, distância de 1 m, temperatura atmosférica de 25°C, temperatura da ótica externa de 20°C e umidade relativa de 50%.

Figura 16: Placa cimentícia com as amostras de tinta comercial, dos nanocompósitos e mista.



Fonte: A autora (2025)

#### 5.4.5 Análise microbiológica

As análises microbiológicas foram realizadas com o objetivo de identificar as zonas de inibição e avaliar a eficácia contra microorganismos dos materiais isolados e dos nanocompósitos, verificando se há sinergia dos componentes para este fim, assim como entender a contribuição de cada um dos componentes.

A técnica de disco-difusão foi realizada seguindo o protocolo M02 do Clinical Laboratory Standards Institute (CLSI), com modificações. Os inóculos bacterianos e fúngicos foram preparados em solução salina 0,9% seguindo a escala McFarland  $0,5 \times 10^8$  UFC/mL para bactérias e  $1,0 \times 10^8$  UFC/mL para fungos. A suspensão com os microrganismos foi semeada em placa de Petri com o ágar Mueller-Hinton para as bactérias e o ágar Sabouraud Dextrose para o fungo. Em seguida, os discos contendo 10 µL das suspensões das amostras foram depositados na placa, sendo que as amostras foram suspendidas em água destilada (1 mg/mL). As placas contendo as bactérias *S. aureus*, *P. aeruginosa* (Pa 01) e *Klebsiella* (Kleb) foram incubadas a 37 °C por 24 h e as placas contendo *C. albicans* foram incubadas a

37°C por 48 h. Estes grupos foram escolhidos por serem representantes clássicos de diferentes tipos de microorganismos patógenos. Após esse período, a atividade antimicrobiana foi determinada medindo-se o diâmetro das zonas inibitórias ao redor de cada disco, refletindo a extensão da supressão do crescimento microbiano. Todos os ensaios foram realizados em duplicata. Tais análises foram realizadas no Departamento de Microbiologia e Parasitologia, no Centro de Ciências da Saúde da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

## 6 Resultados

### 6.1 Materiais precursores

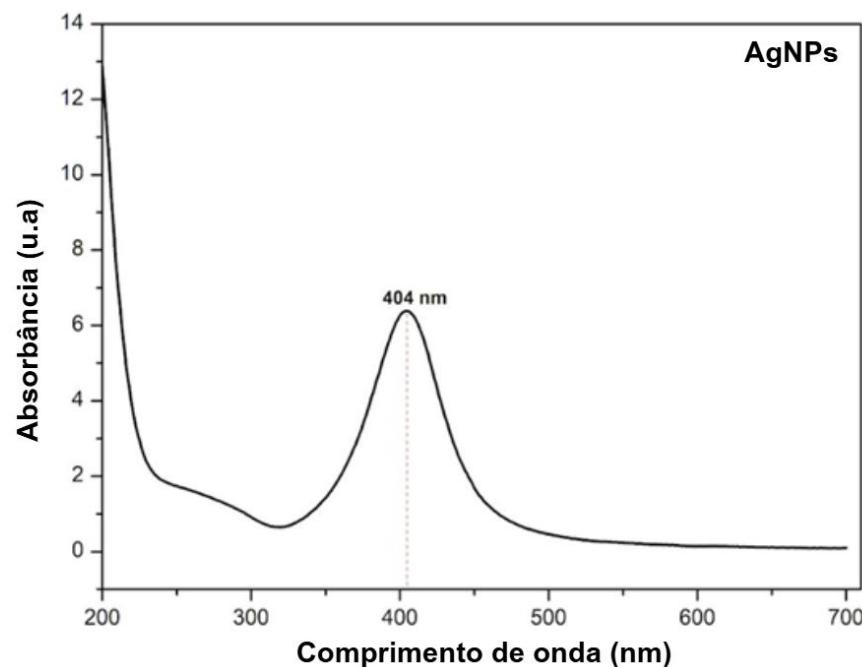
#### 6.1.1 Titulação potenciométrica do GO

A titulação potenciométrica mensurou os grupamentos funcionais ácidos (-COOH) no GO. A concentração encontrada foi de  $3,28 \text{ mmol g}^{-1} \pm 0,55$ , resultado próximo aos encontrados na literatura (Mehl *et al.*, 2014; Matos, 2015) para GOs sintetizados como nesta pesquisa. A quantificação desses grupos funcionais é uma importante ferramenta para verificação da hidrofilicidade do material, visto a utilização do GO nas amostras para interação com a matriz e as nanoestruturas metálicas. É considerado um valor relativamente alto, sugerindo que o GO é bem funcionalizado e, portanto, hidrofílico.

#### 6.1.2 - Espectroscopia UV-Vis do GO e das AgNPs

Nas Figuras 17 e 18 podem-se observar os espectros de absorção das AgNPs e do GO, na região do visível.

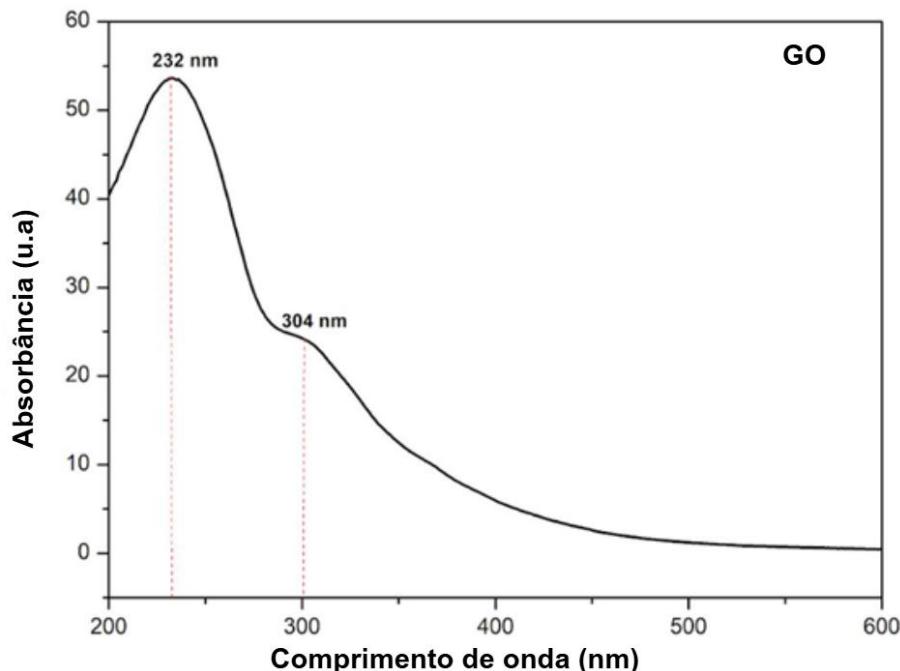
Figura 17: Espectro de absorção molecular no UV-VIS da dispersão das AgNPs.



Fonte: A autora (2024)

O espectro da dispersão das AgNPs sintetizadas neste estudo apresenta uma banda de absorção em aproximadamente 404 nm, atribuída aos plasmons de superfície, que são resultados do acoplamento entre a onda eletromagnética e a oscilação dos elétrons livres de partículas metálicas (Maximino, 2011). Esse resultado é condizente com a literatura (Al-Marhaby *et al.* 2016; De Brito *et al.*, 2021), e indicam que as AgNPs possuem provável formato esférico e diâmetro entre 10 e 20 nm.

Figura 18: Espectro de absorção molecular no UV-VIS da dispersão do GO



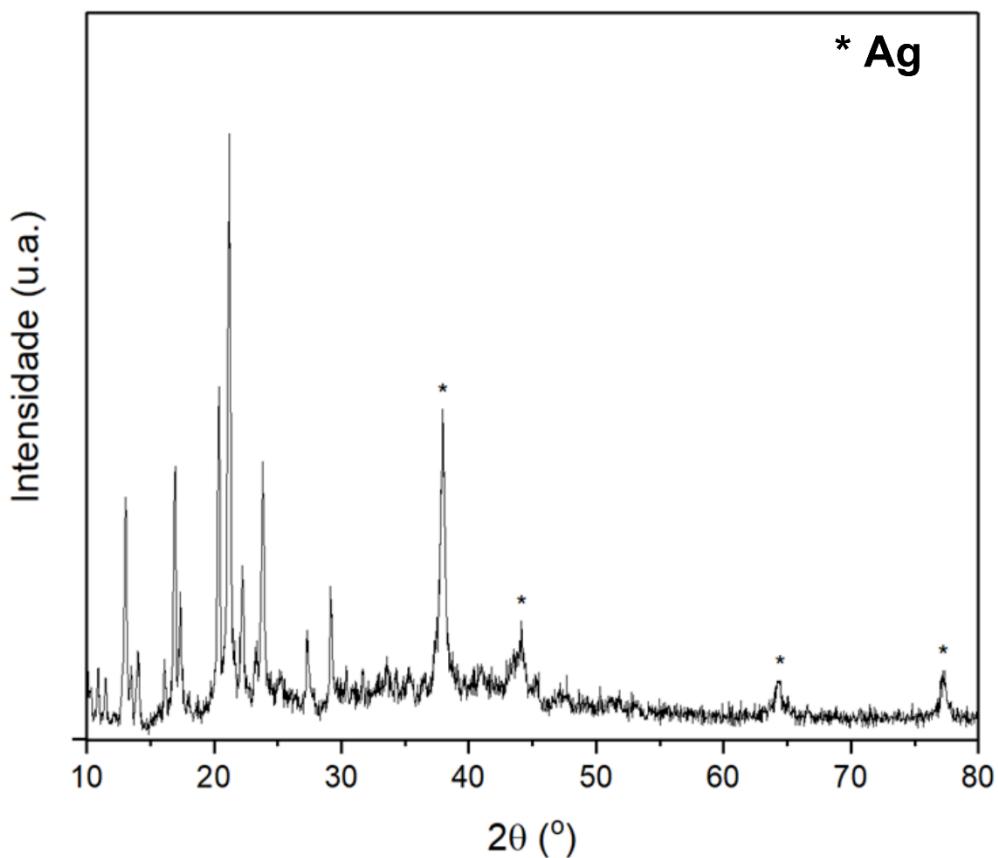
Fonte: A autora (2022)

O espectro de absorção do GO apresenta duas bandas características, uma banda em ~ 232 e um “ombro” em aproximadamente ~304 nm, e da mesma forma que o espectro das as AgNPs, é condizente com a literatura (Cuong, 2010; Mehl, 2015). A banda em ~ 232 nm é atribuída à transição  $\pi \rightarrow \pi^*$  de ligações C-C aromáticas e um ombro em ~ 304 nm atribuído à transição  $n \rightarrow \pi^*$  de ligações C=O.

### 6.1.3 Análise estrutural por DRX

A partir do difratograma da Figura 19, é possível verificar picos em aproximadamente  $38^\circ$ ,  $44,15^\circ$ ,  $64,4^\circ$  e  $77,12^\circ$ , os quais confirmam que houve redução do íon prata ( $\text{Ag}^+$ ) para prata metálica ( $\text{Ag}^0$ ). Esses picos indicam que as partículas obtidas apresentam estrutura cristalina bem definida, com célula unitária do tipo cúbico de face centrada (referência padrão: JCPDS 01-1167), típica da prata metálica em nanopartículas (Pal, Tak, Song, 2007). Ainda, pode-se observar picos de óxido de prata, e borato de prata, possivelmente devido às condições de síntese e/ou exposição ao oxigênio, umidade ou luz.

Figura 19: Difratograma de raios X das AgNPs.



Fonte: A autora (2025)

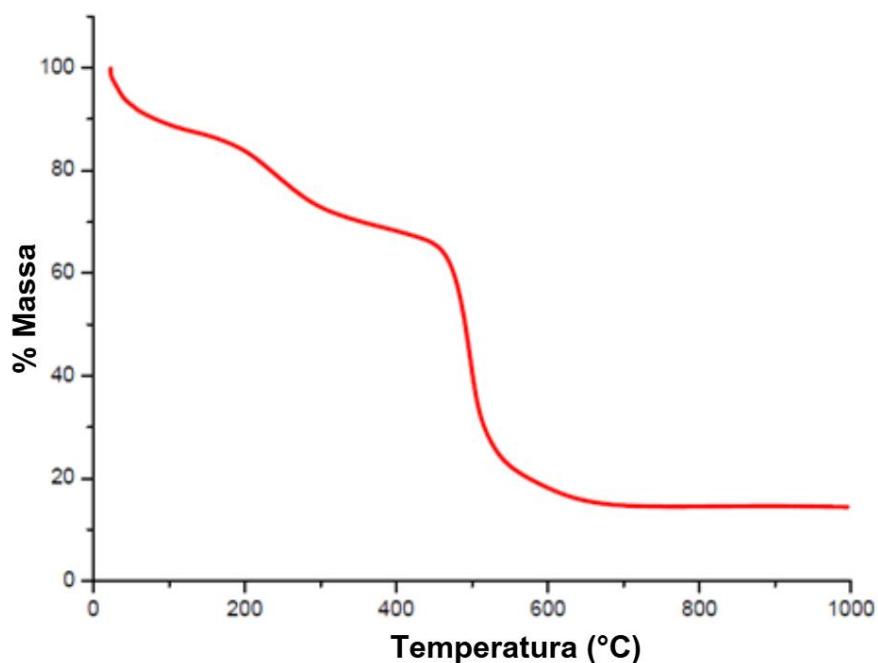
O tamanho médio dos domínios cristalinos, calculado pelo método de Scherrer (2018), foi estimado em aproximadamente 10,5 nm. Adicionalmente, os picos observados em baixos ângulos (entre  $\sim 10$  e  $30^\circ$ ) indicam a presença de CTAB residual ou reorganizado na amostra, o que é comum, especialmente quando o

surfactante não é completamente removido por processos de lavagem ou centrifugação rigorosa (García *et al.*, 2015).

#### 6.1.4 - Análise termogravimétrica do GO

Na análise termogravimétrica (Figura 20), observa-se uma razoável estabilidade térmica do GO, exibindo alguns eventos de perda de massa. O primeiro, na temperatura ambiente até 100°, atribuído à perda de água, o segundo entre 200° e 400°, possivelmente pela perda dos grupamentos oxigenados e um terceiro após os 400°, atribuído à combustão da estrutura carbônica (Matos, 2015).

Figura 20: Curva de TGA do GO



Fonte: A autora (2022)

## 6.2 Materiais nanocompósitos

### 6.2.1 Otimização de processo de preparo dos nanocompósitos

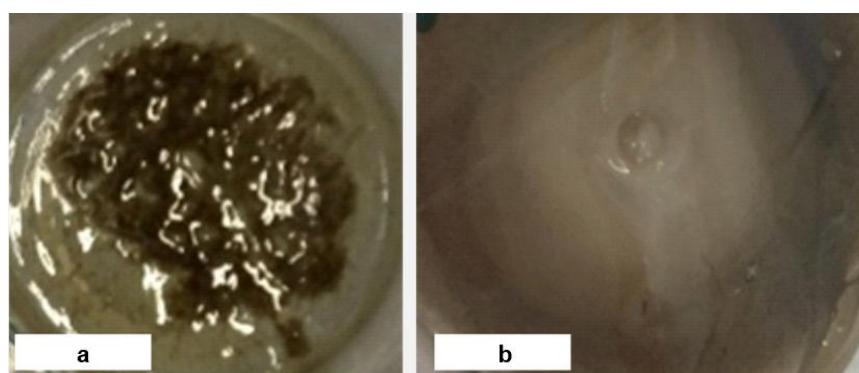
#### 6.2.1.1 Morfologia

Conforme descrito anteriormente, o método de preparo utilizou a tecnologia do látex, no qual é realizada a mistura das dispersões aquosas contendo os nanomateriais juntamente com o látex, e o solvente é removido através da evaporação.

A primeira fase da pesquisa realizou a otimização da síntese destes nanocompósitos, nos quais os primeiros condicionantes estudados foram a concentração de AgNPs e de GO, assim como a temperatura maior de secagem. Outro fator estudado foi a utilização do espessante em algumas amostras.

Para esse preparo, primeiramente a solução contendo as AgNPs e o GO em percentuais pré-estabelecidos foi adicionada à matriz, e a mistura foi homogeneizada por agitação magnética (1200 rpm) durante 10 minutos. Foram testados substratos de deposição das amostras, primeiramente utilizando vidro, após beckers de plástico, resultando em amostras iniciais não homogêneas, visivelmente com aglomerados e sem estabilidade, conforme Figura 21:

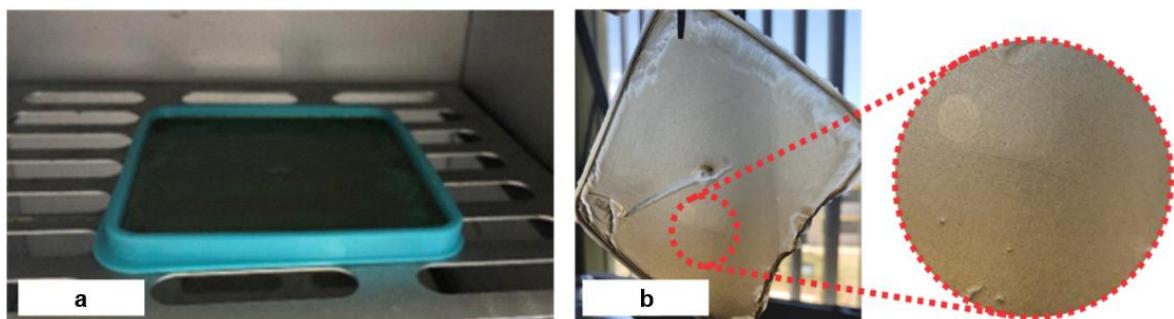
Figura 21: Amostras dos nanocompósitos: Primeiros testes. Imagem a – Nanocompósito depositado em becker de plástico, após secagem, com muitos aglomerados e filme não homogêneo. Imagem b – Filme após secagem em substrato de vidro – amostra já mais homogênea, sem espessante.



Fonte: A autora (2022)

Após os estudos da otimização do processo, chegou-se a seguinte condição de preparo: a solução contendo as AgNPs foi adicionada à matriz e a mistura foi homogeneizada por agitação (1200 rpm) durante 10 minutos. Após, o GO foi adicionado, e repetindo o processo, a mistura foi homogeneizada através de agitação magnética por mais 10 minutos. Após a agitação, as amostras foram depositadas por *casting* em um substrato de poliestireno e colocadas em estufa em temperatura aproximada de 50 graus até a secagem do filme. Na Figura 22 é possível verificar a amostra depositada no substrato na estufa, e a amostra depois de seca, homogênea e estável.

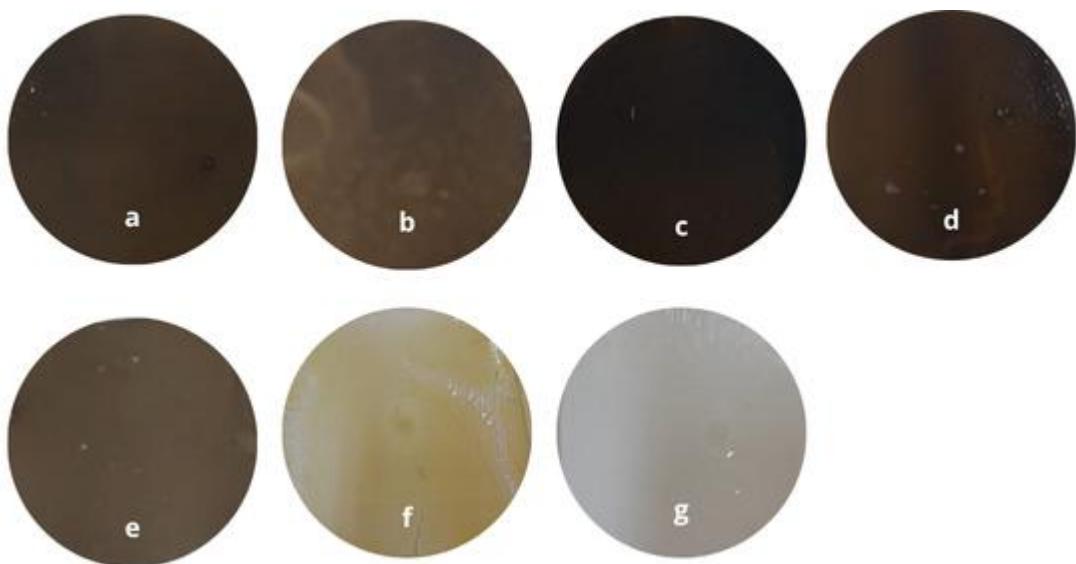
Figura 22: Amostra depositada no substrato em processo de secagem e filme seco. Imagem a – Nanocompósito depositado em substrato de poliestireno, em processo de secagem. Imagem b – Filme após secagem.



Fonte: A autora (2022)

Foram utilizados aproximadamente 12 g de emulsão acrílica e definidas as proporções ideais para os componentes dos nanocompósito. Abaixo, a Figura 23 apresenta a morfologia dos nanocompósito após otimização.

Figura 23: Amostras dos filmes secos após otimização do processo. Imagem a – 02AgNP1GO, imagem b – 1AgNP1GO, Imagem c – 2AgNP2GO, imagem d – 2AgNP2GOE, imagem e – EAGO, imagem f – EAAGNPs, imagem g - EA



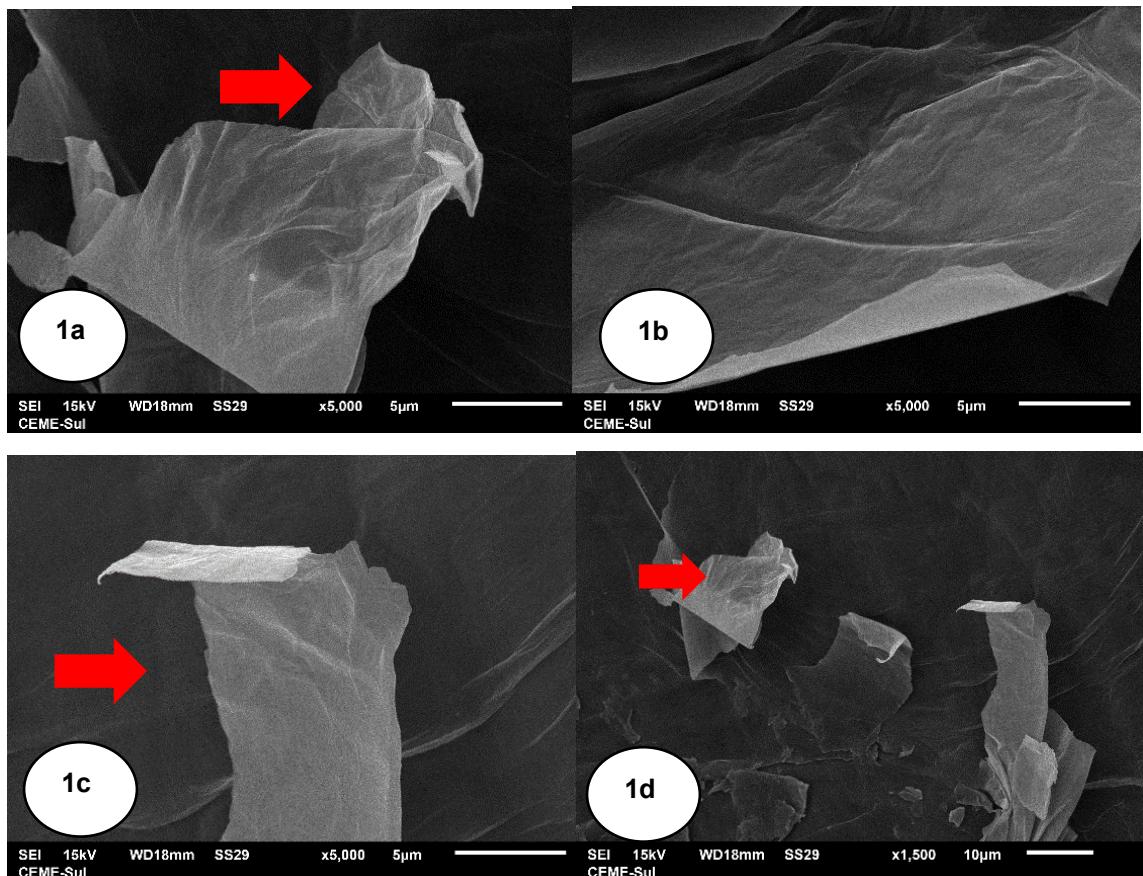
Fonte: A autora (2025)

A espessura resultou em 500 micrômetros, e o filme apresentou boa estabilidade e homogeneidade de uma forma geral. As proporções estão detalhadas na Tabela 3, apresentada anteriormente neste trabalho.

### 6.2.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura permitiu identificar a morfologia do GO e das amostras dos nanocompósitos, assim como a dispersão das cargas de reforço (GO e AGNPs) na matriz. Abaixo são apresentadas na Figura 24 as imagens 1a, 1b, 1c e 1d, da amostra do GO utilizado nos nanocompósitos, onde pode-se observar a folha em destaque nas setas em vermelho.

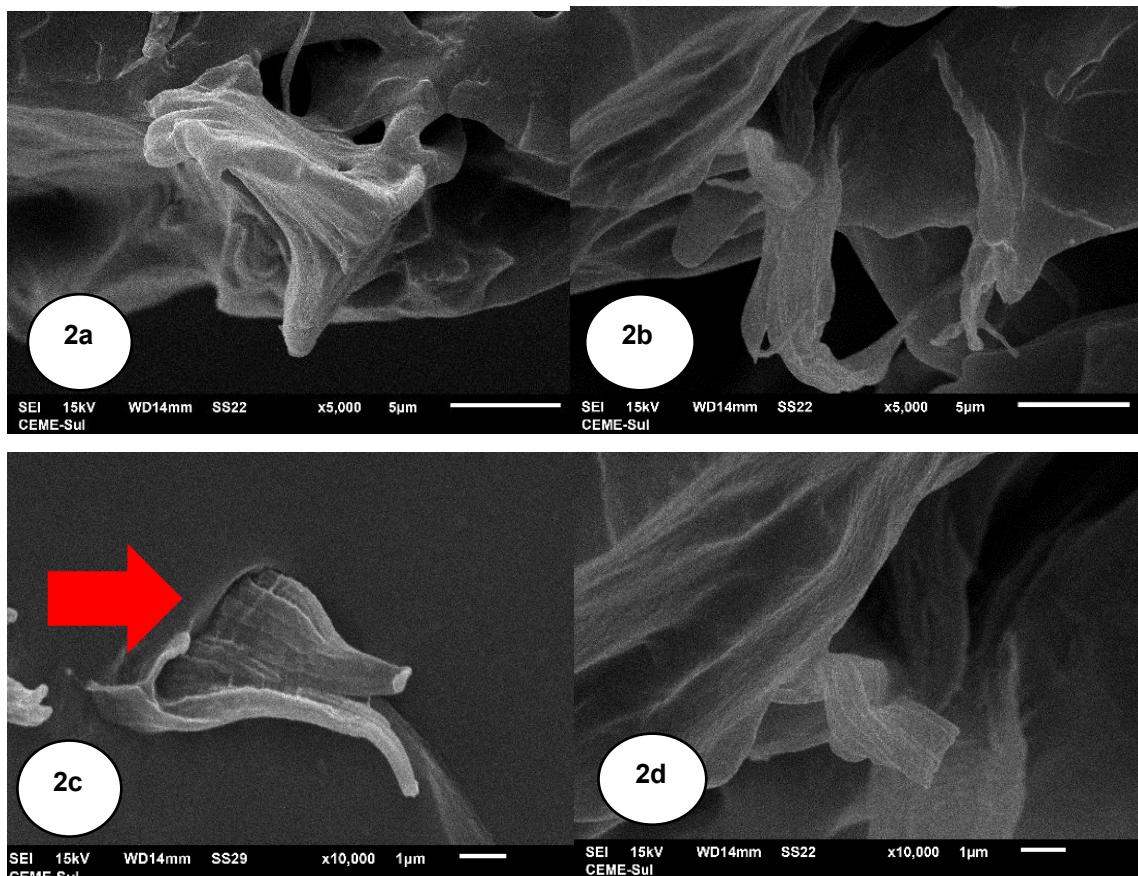
Figura 24: Microscopia eletrônica de varredura da amostra de GO puro. Imagens 1a, 1b, 1c e 1d - Folhas de GO



Fonte: A autora (2025)

As imagens de MEV da amostra 02AgNP1GO, em diferentes magnificações, mostram uma boa homogeneidade do polímero e as nanoestruturas na superfície fraturada (Imagens 2a, 2b, 2d), indicando assim uma possível adesão, sem estruturas soltas. Pode-se observar, na Imagem 2c, onde indica a seta, possivelmente uma folha de GO aderido na matriz, comprovando a boa interação entre os componentes.

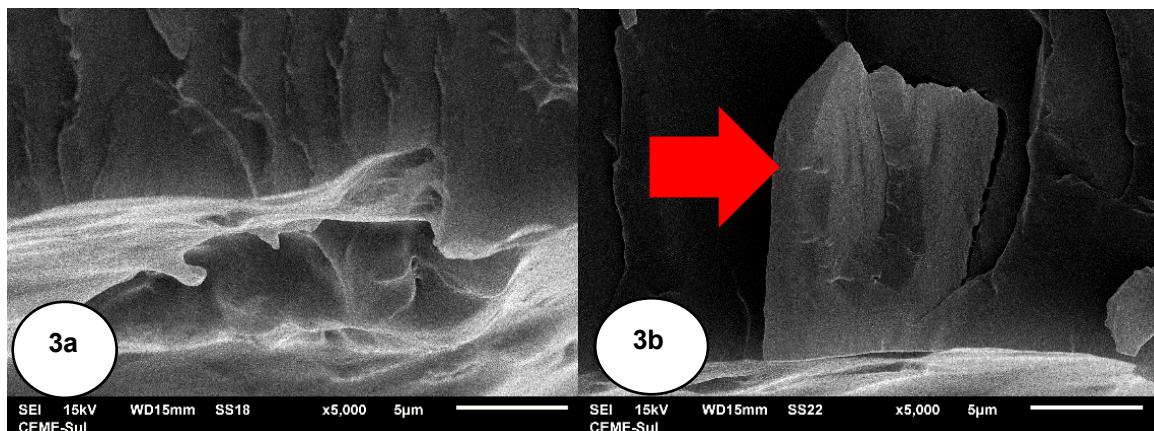
Figura 25: Microscopia eletrônica de varredura da amostra 02AgNP1GO. Imagens 2a, 2b, 2d (nanoestruturas aderidas à matriz), e 2c - Folha de GO aderida



Fonte: A autora (2025)

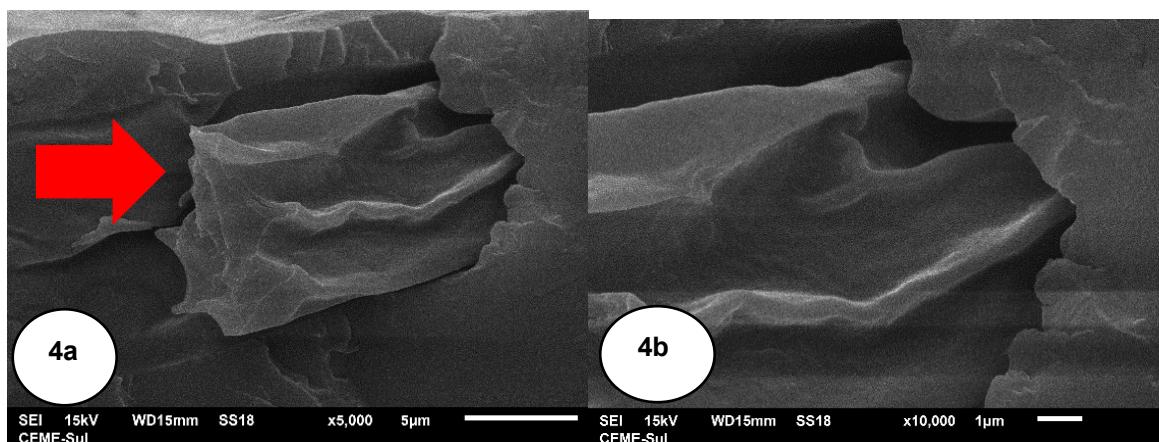
A amostra 1AgNP1GO como pode-se observar nas imagens 3a e 3b, da mesma forma que a amostra anterior, apresenta uma boa compatibilidade entre os componentes, sem nanoestruturas soltas ou isoladas, assim como o nanocompósito da amostra 2AgNP2GO, apresentado nas imagens 4a e 4b.

Figura 26: Microscopia eletrônica de varredura da amostra 1AgNP1GO – Imagens 3a – nanoestruturas aderidas à matriz e 3b - folha de GO.



Fonte: A autora (2025)

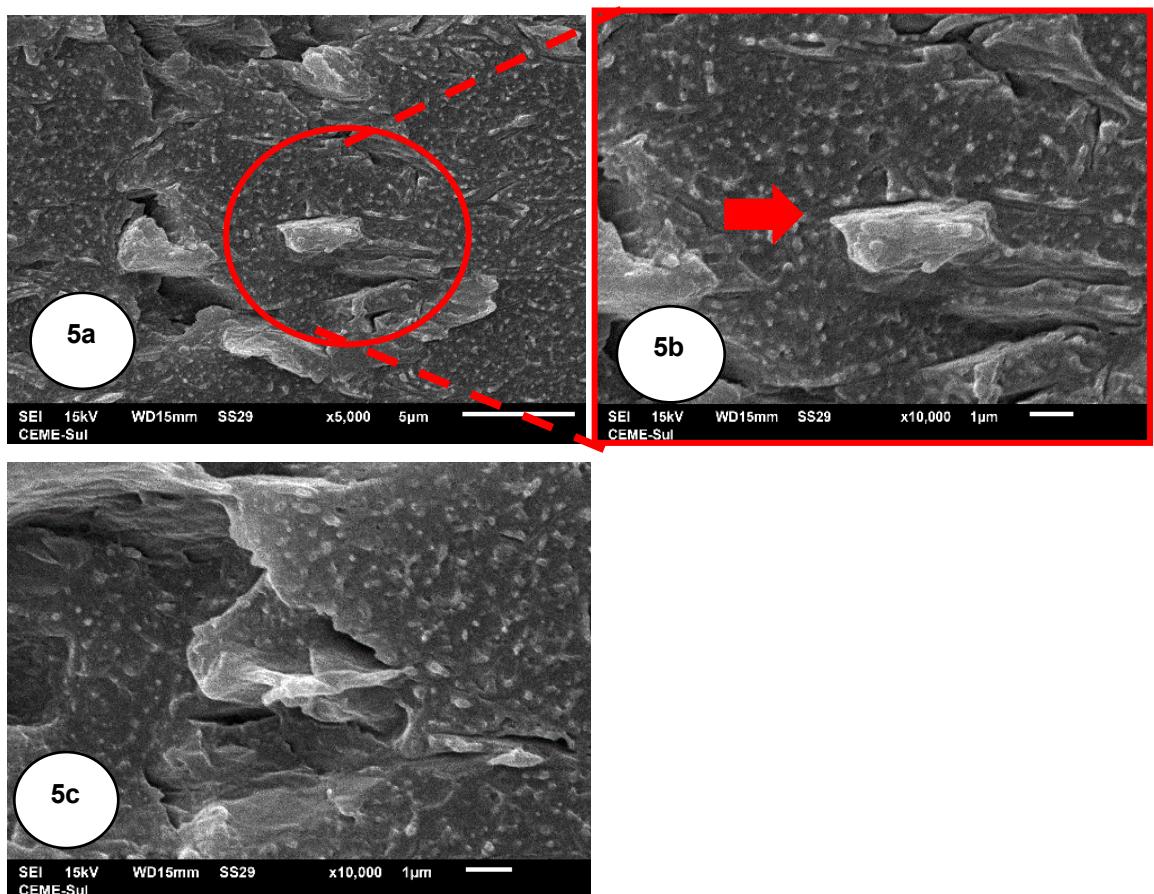
Figura 27: Microscopia eletrônica de varredura da amostra 2AgNP1GO. Imagens 4a e 4b - homogeneidade da matriz e boa adesão com as nanoestruturas



Fonte: A autora (2025)

No nanocompósito 2AgNP2GOE, apresentado na Figura 28, imagens 5a, 5b e 5c, observa-se diferentemente dos demais nanocompósito, uma superfície aparentemente mais rugosa, possivelmente pela presença do espessante na mistura.

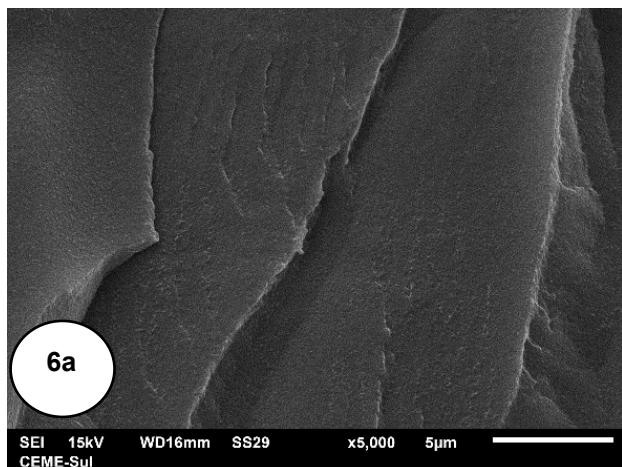
Figura 28: Microscopia eletrônica de varredura da amostra 2AgNP1GOE. Imagens 5a, 5b e 5c – nanocompósito com morfologia rugosa e sem estruturas soltas.



Fonte: A autora (2025)

Nas imagens da amostra EAGO, conforme já apontado em trabalhos anteriores, a emulsão acrílica e o GO apresentam uma homogeneidade, sem estruturas soltas e apresentando compatibilidade entre os componentes – Figura 29, imagem 6a.

Figura 29: Microscopia eletrônica de varredura da amostra EAGO. Imagem 6a – Superfície homogênea.



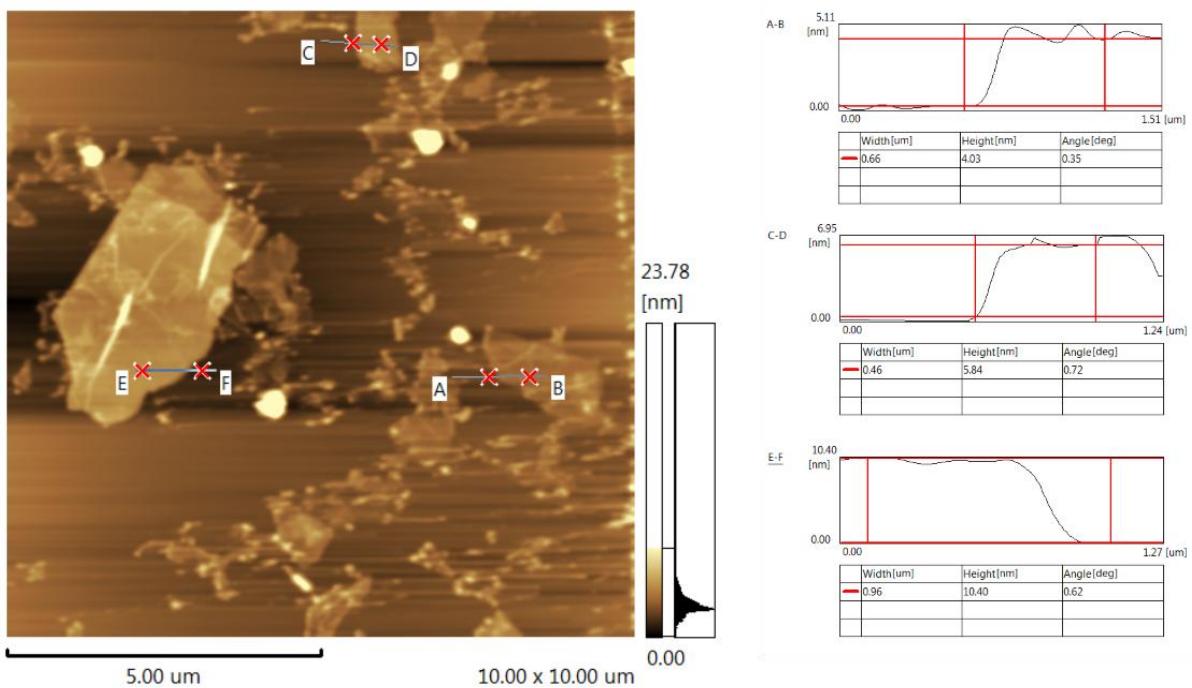
Fonte: A autora (2025)

Como observado, as imagens de Microscopia eletrônica de varredura dos nanocompósito em geral apresentam homogeneidade, mostrando a interação entre os componentes de reforço e a matriz polimérica, sem, aparentemente, estruturas soltas.

### 6.2.3 Microscopia de força atômica (AFM)

Para avaliação com precisão dos materiais precursores e da interação das nanopartículas com a matriz polimérica foram realizados ensaios de microscopia de força atômica. Nos resultados de AFM (Figura 30) são apresentados uma imagem topográfica do GO utilizado, assim como os perfis topográficos nas regiões das linhas A-B, C-D e E-F.

Figura 30: Imagem de AFM do GO em modo topográfico

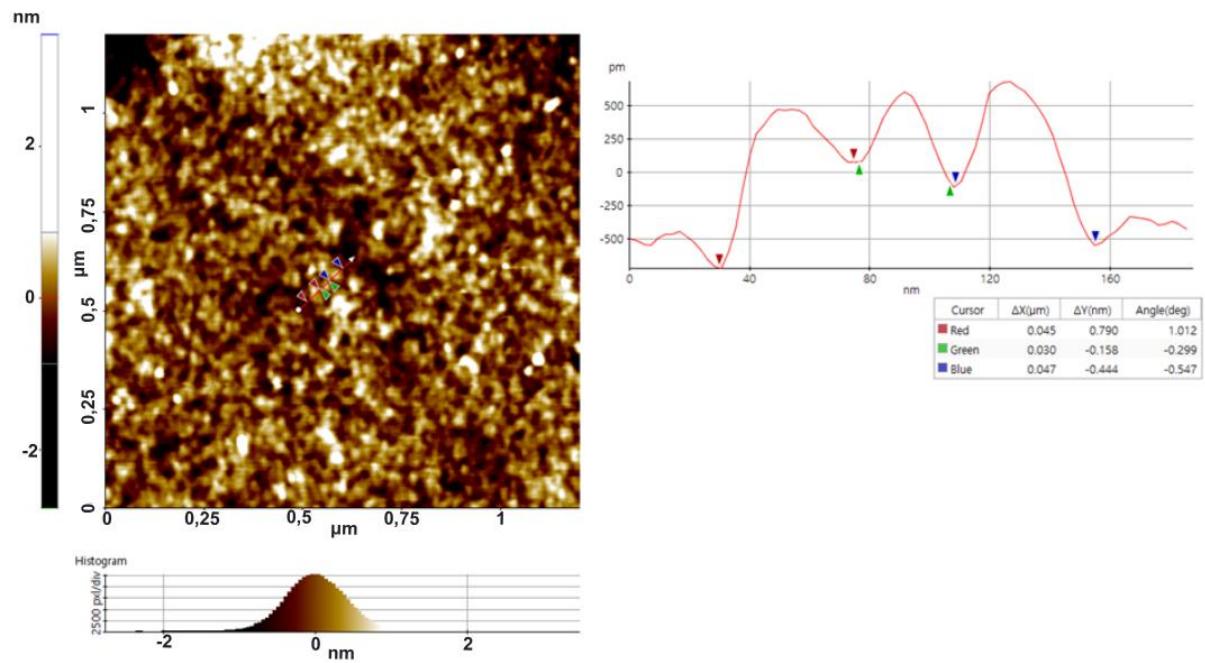


Fonte: A autora (2025)

Os perfis topográficos indicam que o material apresenta poucas camadas de GO (menos de 10) e área de folha variando de 0,1 a 10  $\mu\text{m}^2$ .

Abaixo, na Figura 31, a imagem topográfica das AgNPs, assim como os perfis topográficos na região da linha marcada em vermelho, indicando que as AgNPs possuem entre 35-50 nm, a partir de uma estatística com aproximadamente 50 nanopartículas. O valor obtido diverge daquele encontrado por espectroscopia UV-Vis devido às diferenças intrínsecas entre as técnicas. Enquanto o UV-Vis avalia a banda plasmônica de nanopartículas isoladas em solução, o AFM é realizado sobre o material seco, cuja medida inclui não apenas as partículas, mas também a camada de passivante presente na amostra.

Figura 31: Imagem de AFM das AgNPs em modo topográfico



Fonte: A autora (2025)

O modo Nanomecânico PinPoint™ proporciona máxima resolução e precisão na caracterização nanomecânica. Em tempo real, mede simultaneamente rigidez, módulo de elasticidade e forças de adesão. Durante a pausa do scanner XY, curvas força-distância de alta velocidade são registradas com controle preciso da força e do tempo de contato entre a ponta e a amostra. Graças ao controle sobre o tempo de aquisição dos dados, essa tecnologia otimiza medições nanomecânicas, garantindo alta relação sinal-ruído em diferentes tipos de superfície. Na Tabela 4 abaixo pode-se observar um comparativo entre os resultados encontrados para as diferentes amostras dos nanocompósitos, onde cada um deles será discutido acompanhando as imagens microscópicas.

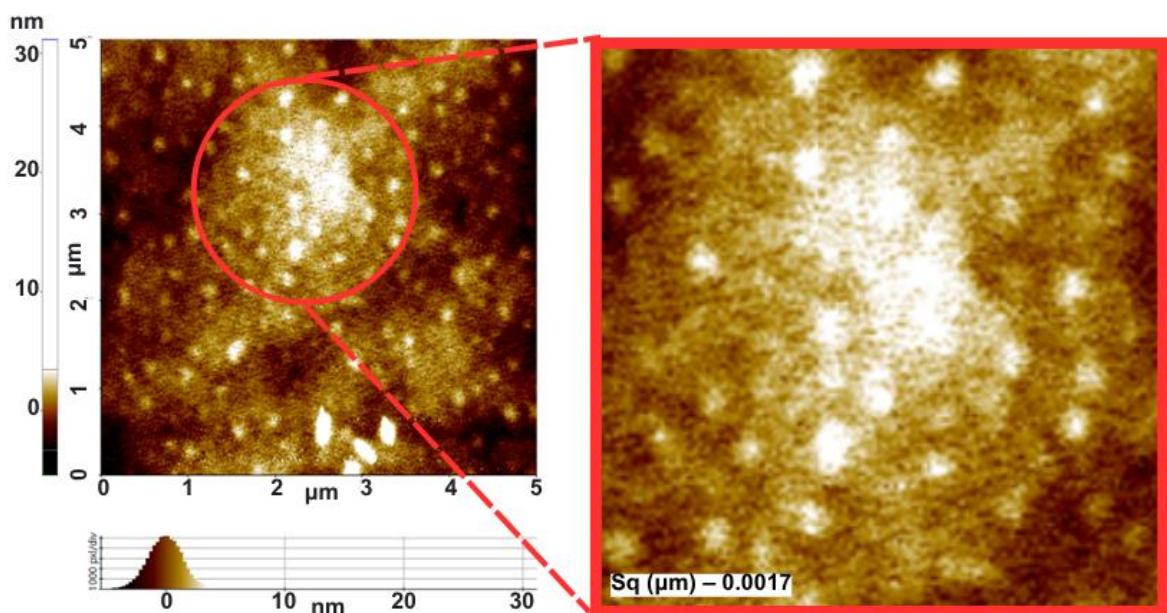
Tabela 4: Comparativo entre os resultados encontrados por AFM para as diferentes amostras dos nanocompósitos

AMOSTRA	TOPOGRAFIA	DUREZA	MÓDULO DE ELASTICIDADE	FORÇA DE ADESÃO	RUGOSIDADE (Sq <sup>1</sup> )
<b>EA</b>	Partículas bem definidas	0,1KN/m	3,5 GPa	160nN	0,0017
<b>02AgNP1GO</b>	Partículas em processo de coalescência	90N/m	4,7 GPa	360nN	0,0061
<b>2AgNP2GO</b>	Partículas em processo de coalescência	55N/m	1,8GPa	0,6µN	0,0202
<b>EAGO</b>	Partículas em processo de coalescência	90N/m	4,3 GPa	325nN	0,0059
<b>EAAgNP</b>	Partículas em processo de coalescência	75N/m	-	390nN	0,0008

Fonte: A autora (2025)

Nas imagens abaixo pode-se observar a relação das amostras com as imagens de AFM nos modos de topografia, dureza, módulo de elasticidade e força de adesão, além dos valores de rugosidade de cada uma. As imagens de topografia geral das amostras com nanopartículas apresentam partículas de látex em processo de coalescência ou já coalescidas. O uso do surfactante CTAB facilita esse processo de coalescência, conforme já verificado em trabalhos anteriores na literatura (Ramos, 2018). As imagens somente da emulsão acrílica (EA), apresentam as partículas de látex bem definidas (ainda não coalescidas), conforme pode-se observar na Figura 32 abaixo.

Figura 32: Imagem da Emulsão Acrílica (EA) em modo topográfico

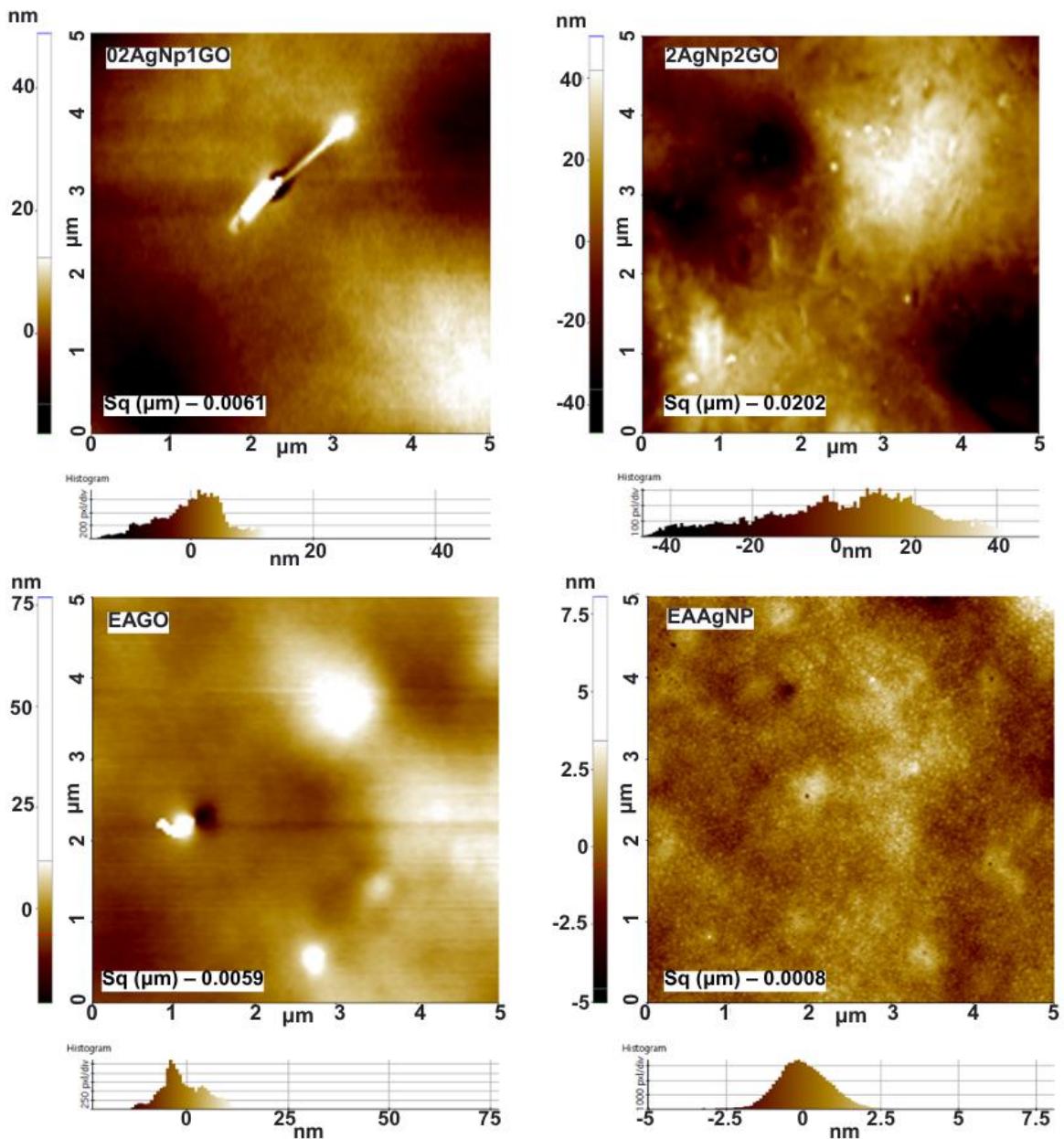


Fonte: A autora (2025)

Nota-se ainda que a rugosidade de nanocompósitos utilizando AgNPs+GO aumenta com o aumento da concentração dos dois componentes (amostra 2AgNP2GO -  $Sq^1 = 0,0202$ ), sendo mais áspera a superfície, o que pode beneficiar no contato com o substrato, no caso da utilização como revestimento. Já a amostra EAGO apresenta uma rugosidade ( $Sq = 0,0059$ ) mais alta em comparação à amostra EAAGNP ( $Sq = 0,0008$ ), a qual apresenta rugosidade menor mesmo em comparação com o látex puro – EA, da imagem apresentada acima ( $Sq = 0,0017$ ).

<sup>1</sup> Sq é um dos parâmetros usados para caracterizar a rugosidade superficial em medições tridimensionais. Ele representa a desvio quadrático médio da altura da superfície em relação a uma linha média ou plano de referência.

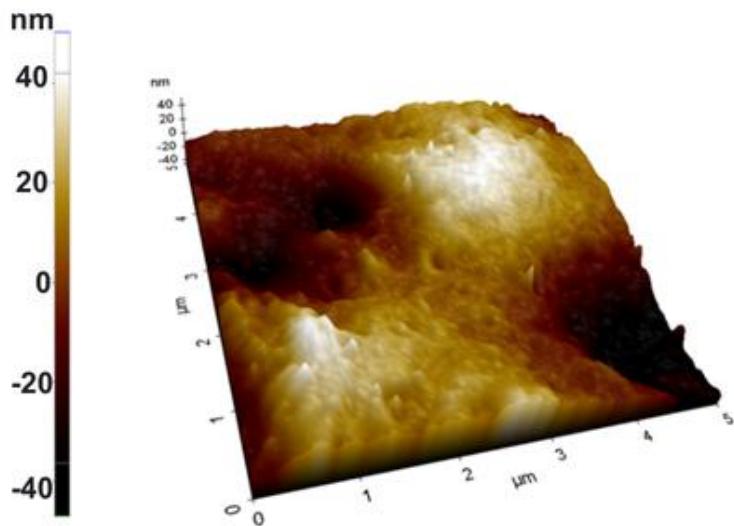
Figura 33: Imagens em modo topográfico das amostras 01AgNP1GO, 2AgNP2GO, EAGO e EAAgNP



Fonte: A autora (2025)

Abaixo pode-se observar a imagem 3D da amostra 2AgNP2GO no modo topografia, para melhor visualização da rugosidade.

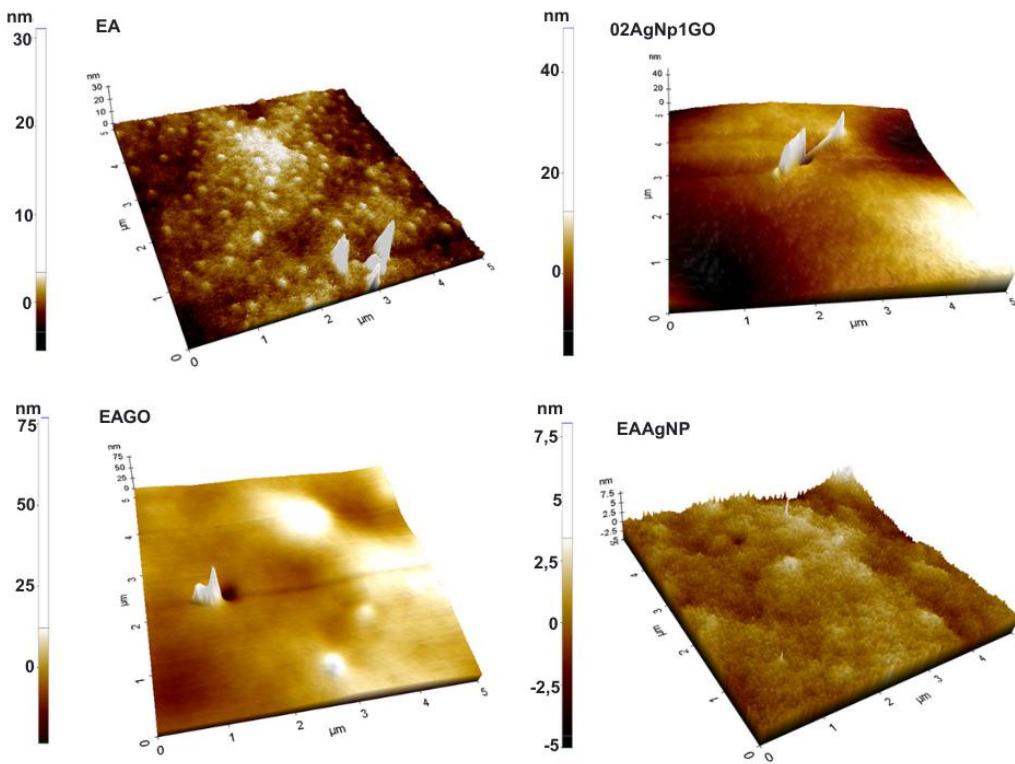
Figura 34: Imagem 3D da amostra 2AgNP2GO no modo topografia



Fonte: A autora (2025)

Abaixo, na Figura 35, as imagens 3D do modo topografia respectivamente das amostras EA,02AgNP1GO, EAGO e EAAgNP.

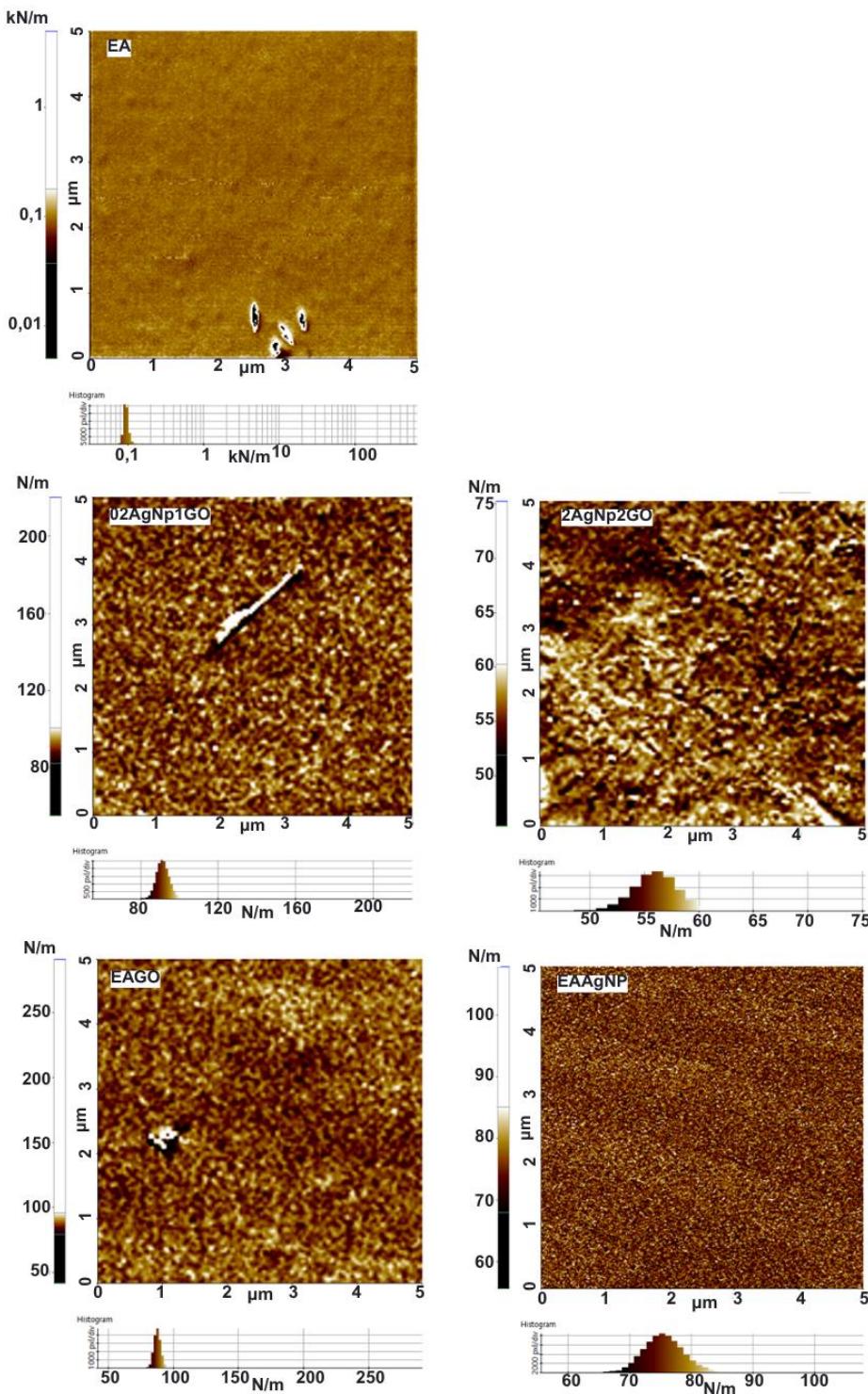
Figura 35: Imagens em 3D - modo topografia, das amostras EA,02AgNP1GO, EAGO e EAAgNP.



Fonte: A autora (2025)

Quanto à dureza, todos os nanocompósitos foram menos duros que o látex puro, sendo a amostra 2AgNP2GO a que apresentou menor valor. Estas imagens permitem identificar heterogeneidades mecânicas na superfície do filme, como domínios com diferentes graus de reticulação, cristalinidade ou composição, o que se pode observar na heterogeneidade das superfícies das amostras contendo os nanomateriais. Um resultado de menor dureza neste ensaio pode apontar uma tinta mais flexível, útil para superfícies que sofrem dilatação ou vibração.

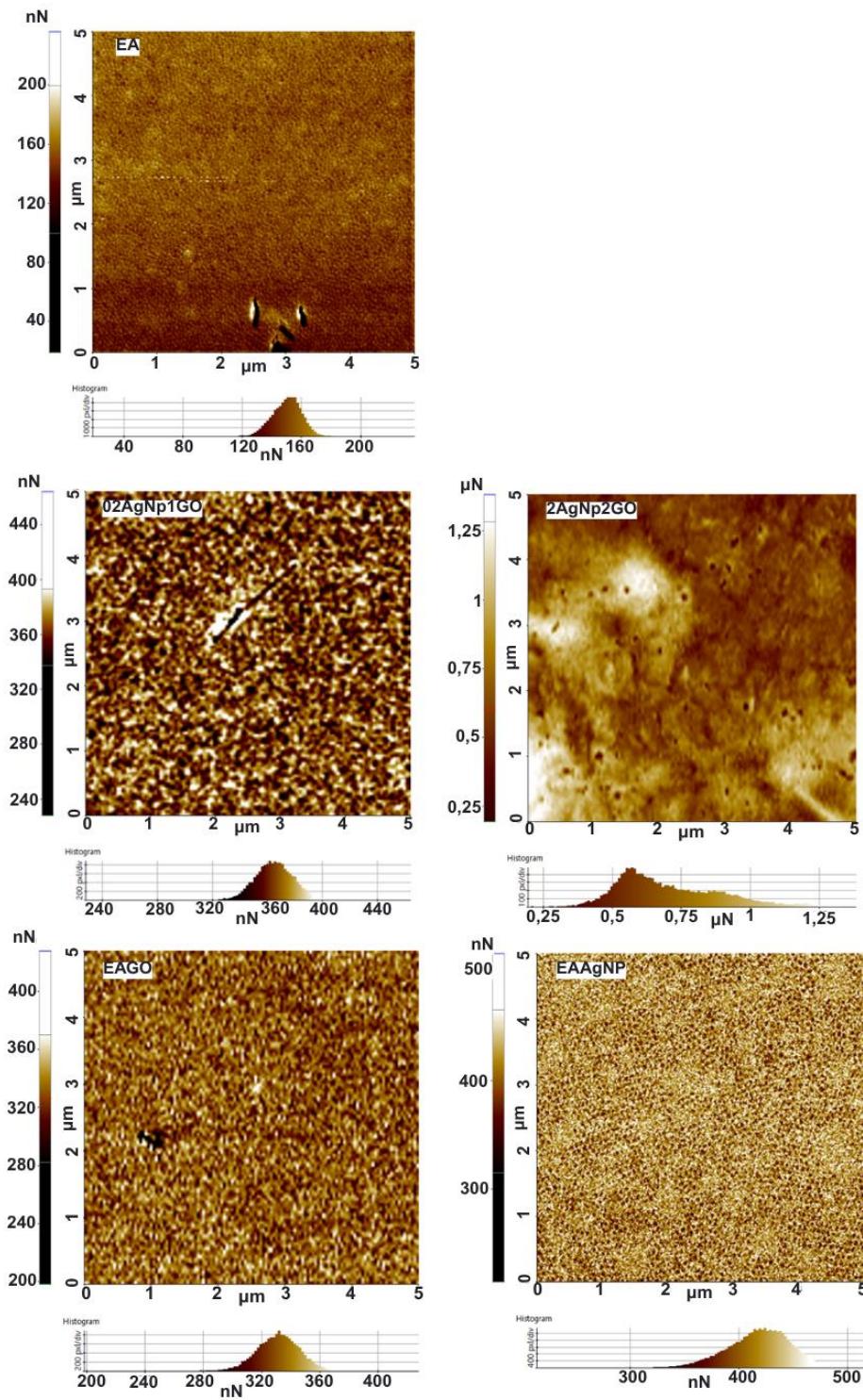
Figura 36: Imagens em modo topográfico de dureza das amostras: EA, 02AgNP1GO, 2AgNP2GO, EAGO e EAAgNP.



Fonte: A autora (2025)

As Imagens AFM dos nanocompósitos mostram que a inserção do GO e das AgNPs aumenta a adesividade do polímero, especialmente a amostra 2AgNP2GO. Em todas as amostras nota-se o aparecimento de uma segunda região com valores mais elevados, característica de materiais de reforço. Relacionando com esta pesquisa, tintas com alta adesividade, por exemplo, podem aderir melhor a superfícies metálicas, cerâmicas ou poliméricas, reduzindo o risco de descascamento. Ainda, a boa adesão evita falhas por abrasão ou impacto, o que é essencial em ambientes agressivos.

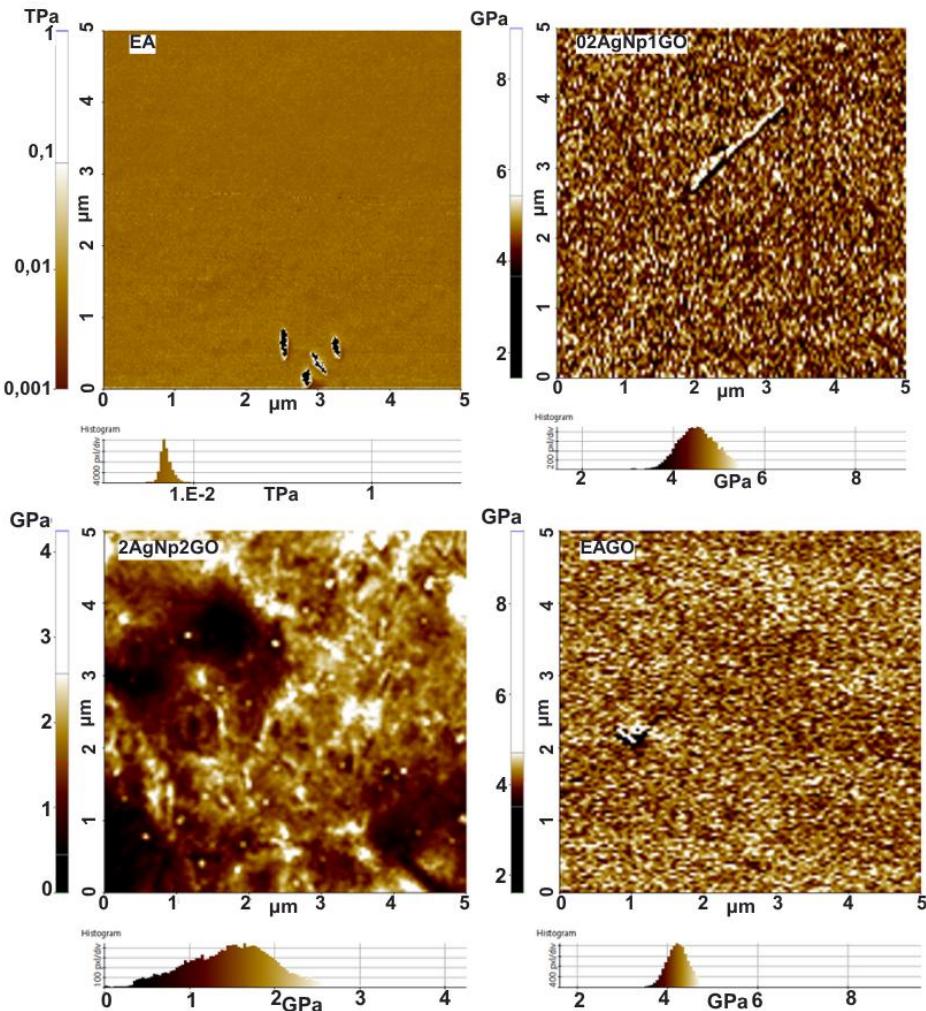
Figura 37: Imagens em modo topografia da força de adesão das amostras: EA, 02AgNP1GO, 2AgNP2GO, EAGO e EAAgNP.



Fonte: A autora (2025)

O módulo de elasticidade da amostra 2AgNP2GO diminuiu em comparação com o látex puro, mostrando que em sua maioria o material é menos rígido. A amostra 02AgNP1GO apresentou um módulo de elasticidade mais elevado em sua maioria, na faixa dos 4,7 GPa, mostrando uma maior rigidez, enquanto o módulo de elasticidade da emulsão acrílica pura (EA) ficou na faixa de 3,5 GPa, mais flexível. Já a amostra EAGO, contendo apenas a emulsão acrílica e o óxido de grafeno, teve seu módulo de elasticidade na faixa de 4,3 GPa. Esses resultados acontecem, pois, a sonda toca a superfície em vários pontos e mede a força necessária para deformar o material localmente, e o módulo de elasticidade é medido em cada ponto. Pode-se observar que nos filmes com as amostras dos nanocompósito, os domínios duros e moles aparecem intercalados na imagem, revelando a heterogeneidade mecânica da superfície. Já a imagem somente da EA apresenta uma maior homogeneidade mecânica, devido à ausência dos nanomateriais como reforço.

Figura 38: Imagens em modo topografia do módulo de elasticidade das amostras: EA, 02AgNP1GO, 2AgNP2GO e EAGO.



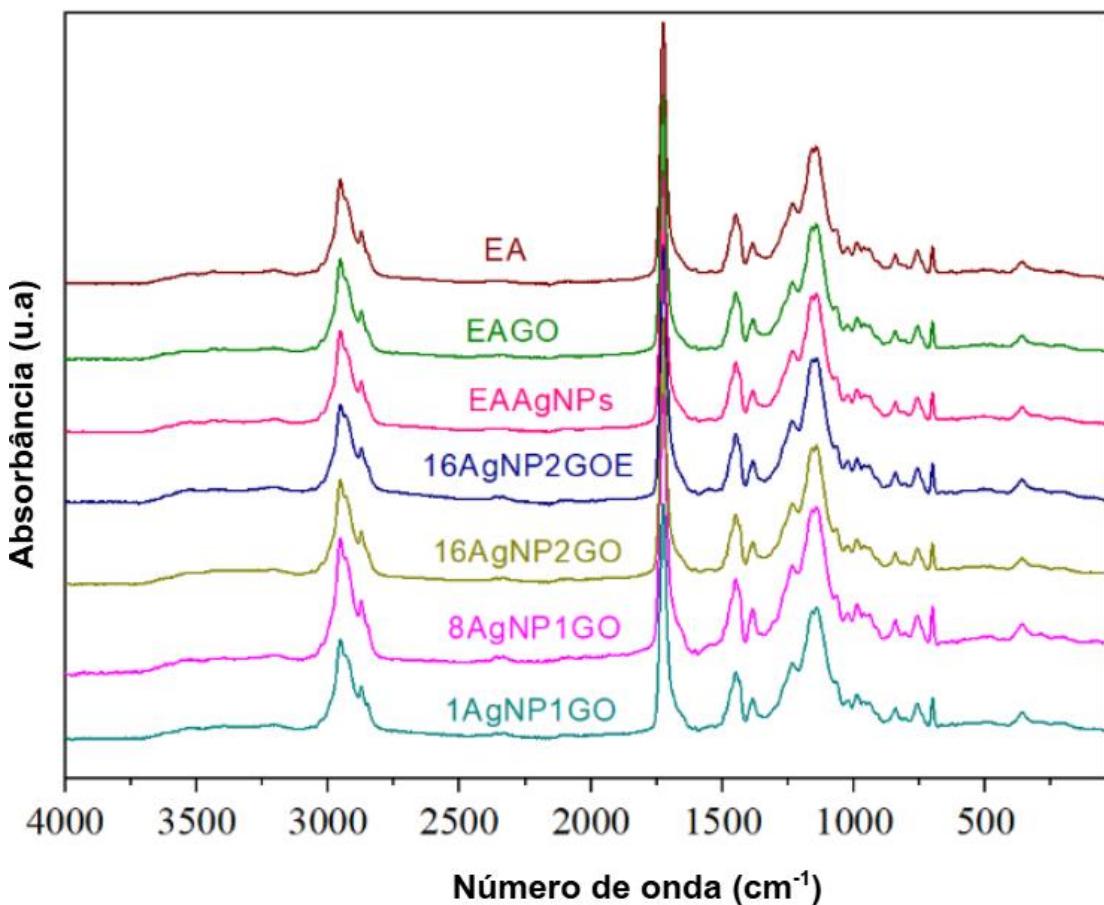
Fonte: A autora (2025)

Conclui-se, a partir dos resultados nanomecânicos, que em sua maioria as amostras dos nanocompósito mostram-se mais rígidas, com exceção da amostra 2AgNP2GO, provavelmente em função da maior concentração dos nanomateriais de forma aglomerada ou não totalmente dispersa. Pode também ser devido a alguma mudança no comportamento da matriz, tornando-a mais dúctil, o que é vantajoso no caso da resistência ao impacto, mas diminuindo seu módulo de elasticidade. Como o AFM capta propriedades em regiões extremamente pequenas, se houver uma fase mais macia ou menos reforçada naquele ponto, ele detecta um módulo menor, o que pode causar divergência nos resultados do módulo de Young do ensaio de tensão-deformação, o que vai ser observado mais adiante neste trabalho.

### 6.2.4 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier – FTIR

A Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier possibilita obter um espectro infravermelho de absorção ou emissão de uma amostra. Em diferentes comprimentos de onda, pode-se obter informações a respeito da composição molecular e estrutura do material. Foi realizado o ensaio com todas as amostras dos nanocompósitos, assim como com a amostra controle (só a emulsão acrílica), e as amostras controle com GO e AgNPs. Abaixo, na Figura 39 pode-se observar o espectro e a tabela comparativa (Tabela 5) das frequências experimentais encontradas na literatura (Faia, 2018; Pilz, 2004).

Figura 39: Espectro FTIR da emulsão acrílica e das amostras dos nanocompósitos



Fonte: A autora (2025)

De acordo com o observado no espectro acima, os picos mais intensos aparecem entre 1135 e 1726 cm<sup>-1</sup>, o primeiro correspondendo a ligação C-O e o

segundo à ligação C=O (Faia, 2018). Segundo Pilz (2004) as absorções das regiões próximas a 2956 a 2870 cm<sup>-1</sup> são referentes a estiramento simétrico e assimétrico das ligações carbono-hidrogênio dos grupamentos metila (CH<sub>3</sub>) e metileno (CH<sub>2</sub>). A absorção em 1726 cm<sup>-1</sup> refere-se ao estiramento da ligação da carbonila do grupamento éster, as absorções de 1450 a 1390 cm<sup>-1</sup> referem-se a vibrações de flexão no plano da ligação carbono-hidrogênio dos grupamentos metila (CH<sub>3</sub>) e metileno (CH<sub>2</sub>); e 1234 e 1135 cm<sup>-1</sup> são vibrações de estiramento das ligações éster.

Tabela 5: Comparativo das frequências experimentais encontradas na literatura (Faia, 2018; Pilz, 2004).

Frequência experimental observada	Faia (2018)	Pilz (2004)	Atribuição tentativa
2956m	2956w	2954m	C-H
2870w		2874w	CH <sub>3</sub>
1726s	1727s	1733s	C=O
1450m	1450m	1450m	CH <sub>2</sub> / CH <sub>3</sub>
1390w	1385w	1386w	CH <sub>3</sub>
1234m	1236m	1240m	C-O
1135s	1143s	1148s	C-O

w- Pico de intensidade fraca; m- pico de intensidade média; s- pico de intensidade forte

Fonte: A autora (2025)

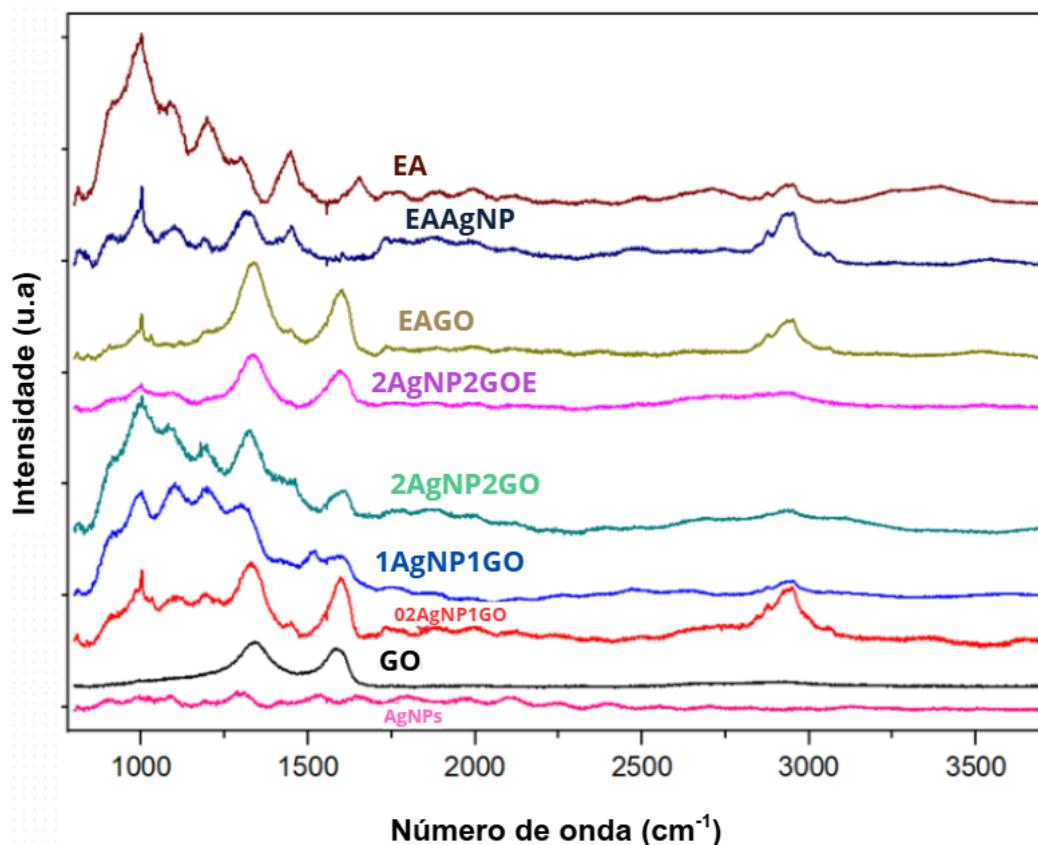
Ao comparar o espectro da emulsão acrílica com o espectro das amostras utilizando as nanoestruturas, pode-se claramente observar que a sua incorporação não altera a estrutura da matriz. Não foram observadas bandas características das AgNPs e do GO, possivelmente pela baixa concentração desses nanomateriais utilizados em cada amostra, permanecendo assim a estrutura da emulsão acrílica sem alterações, mantendo as características químicas do material.

### 6.2.5 Espectroscopia Raman

Na espectroscopia Raman (Figura 40) pode-se observar as bandas características da emulsão acrílica, como a banda em 810 cm<sup>-1</sup>, associadas a

vibrações torcionais, a banda em  $1000\text{ cm}^{-1}$  relacionada a C-O (vibrações de estiramento em ésteres), as bandas em  $1087\text{ cm}^{-1}$ ,  $1197\text{ cm}^{-1}$  e  $1302\text{ cm}^{-1}$  características das cadeias poliméricas acrílicas, a vibração em  $1448\text{ cm}^{-1}$ , característica da Deformação  $\text{CH}_2/\text{CH}_3$ , a vibração em  $1657\text{ cm}^{-1}$  da dupla ligação carbono-carbono, a vibração em  $1738\text{ cm}^{-1}$  - estiramento da ligação C=O, típica de acrilatos e metacrilatos e as bandas em  $2870\text{ cm}^{-1}$  e  $2952\text{ cm}^{-1}$ , atribuídas a vibrações de estiramento das ligações C-H em cadeias alifáticas (hidrocarbonetos presentes no polímero). Para o GO, pode-se observar a vibração em  $1345\text{ cm}^{-1}$  (Banda D - associada a defeitos, bordas ou desordens na estrutura, como presença de grupos funcionais oxigenados no GO, e a vibração em  $1580\text{ cm}^{-1}$  (Banda G - vibrações tangenciais dos átomos de carbono em uma rede hexagonal).

Figura 40: Espectroscopia Raman dos materiais precursores e dos nanocompósitos



Fonte: A autora (2025)

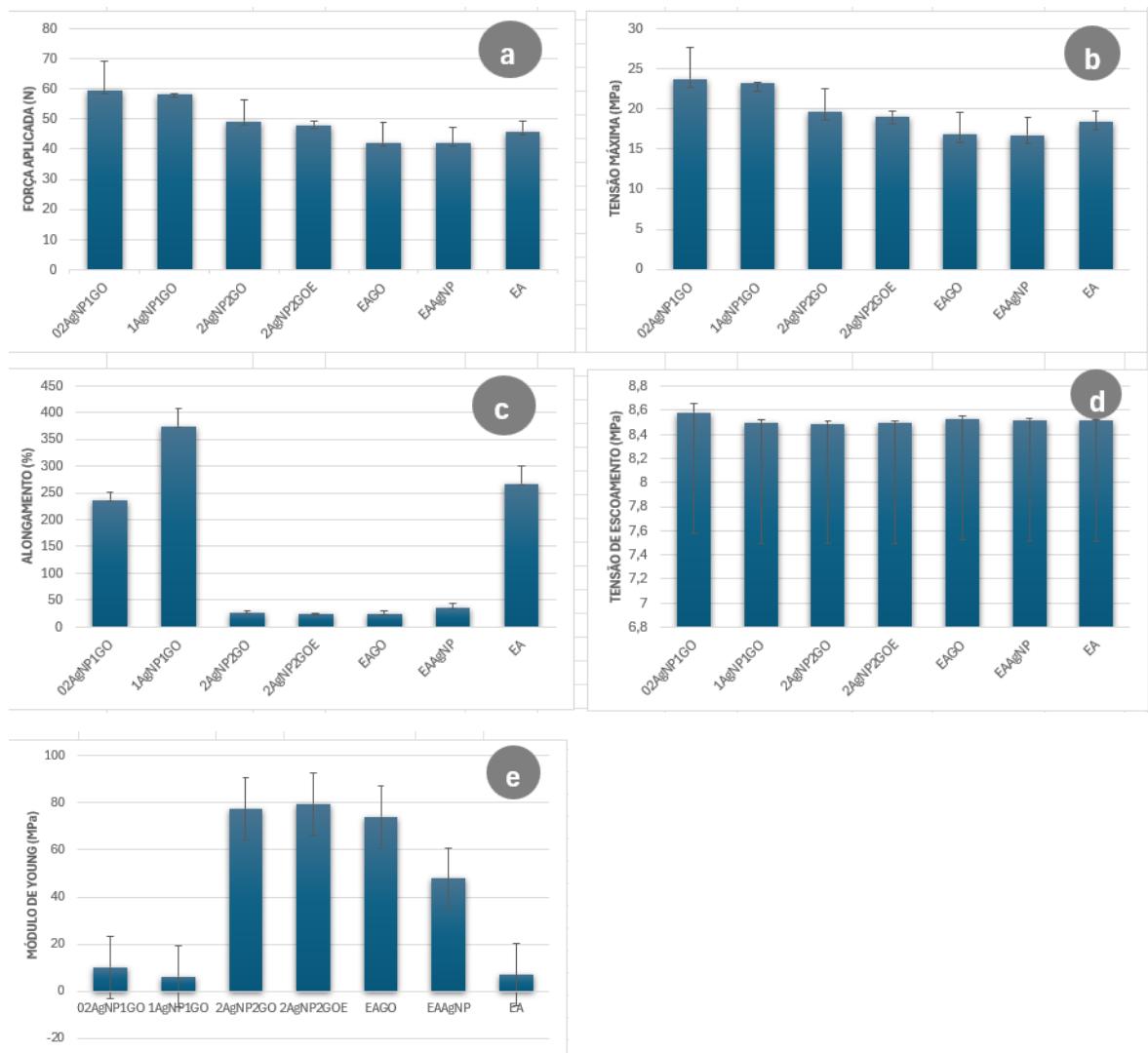
A incorporação das AgNPs resultou na supressão de determinadas bandas características observadas na emulsão pura, como a vibração em  $1657\text{ cm}^{-1}$ , além de provocar alterações nas intensidades relativas de alguns sinais Raman (1000

$\text{cm}^{-1}$ , 1087  $\text{cm}^{-1}$ , 1197  $\text{cm}^{-1}$ , 1302  $\text{cm}^{-1}$ , 1448  $\text{cm}^{-1}$  e 2952  $\text{cm}^{-1}$ ) indicando possíveis interações entre os componentes da matriz e as nanopartículas. A incorporação do GO na emulsão acrílica mostra o espectro majoritário do GO, apresentando uma mudança na intensidade relativa entre as bandas D e G, podendo ser um indicativo de transferência de carga mecânica e/ou stress. A EA passa a atuar como um "defeito", por isso observa-se esse aumento da banda D no espectro. Quando as AgNPs são incorporadas juntamente com o GO, essas interações podem ser observadas nas mudanças do espectro Raman, devido ao efeito SERS (Surface-Enhanced Raman Scattering), que aumenta a intensidade dos sinais Raman, como pode-se observar no aumento da intensidade relativa das bandas D e G, devido à criação de "pontos quentes" onde o campo eletromagnético é intensificado. O aumento da intensidade pode-se observar nas amostras 02AgNP1GO, 2AgNP2GO, 2AgNP2GOE. Na amostra 02AgNP1GO, onde apresenta menor quantidade dos nanomateriais, pode-se observar a predominância dos sinais do GO. As demais vibrações percebidas nas amostras dos nanocompósitos percebem-se na emulsão acrílica.

#### **6.2.6 Análises mecânicas**

Nos gráficos abaixo são apresentados os resultados encontrados para as análises mecânicas de todas as amostras dos nanocompósitos.

Figura 41: Imagem a – Força aplicada (N), imagem b – Tensão máxima (MPa), imagem c – alongamento (%), imagem d – tensão de escoamento (MPa) e imagem e – módulo de elasticidade (MPa)



Fonte: A autora (2025)

A força aplicada, medida em Newtons, é a carga que é exercida sobre o corpo de prova durante o teste de tração que vai aumentando progressivamente até a deformação do material, e, eventualmente, seu rompimento. A maior força aplicada foi encontrada na amostra A - 02AgNP1GO - 59,37 N, seguida da amostra B - 1AgNP1GO, de 58,09 N. A amostra 02AgNP1GO também teve a maior tensão máxima aplicada, de 23,75 MPa, a qual indica o ponto de maior resistência do material sob tração, antes de começar a deformar permanentemente ou se romper. Já o maior alongamento, que é a capacidade do filme de se alongar até se romper

(sendo uma medida da deformação plástica), foi encontrado na amostra 1AgNP1GO (373,91%) - apresentando alta flexibilidade e ductilidade, sendo maior ainda que a emulsão acrílica pura (266,38%). O menor alongamento foi observado na amostra EAGO (22,71%), mostrando ser um material mais rígido e quebradiço.

Sendo a tensão de escoamento a máxima tensão que um material é capaz de suportar dentro do domínio elástico de deformação (Shackelford, 2008), a amostra que apresentou maior valor foi a amostra 02AgNP1GO, sendo 8,58 MPa. A amostra EAGO foi a que apresentou valor mais próximo, de 8,53 MPa. As amostras EA e EAAgNP apresentaram valores de 8,52 MPa, e as amostras 1AgNP1GO e 2AgNP2GOE de 8,50MPa. A amostra 2AgNP2GO (sem espessante) apresentou o menor valor, 8,49MPa.

De acordo com Hessel *et al.* (2016), o módulo de Young (Y) é uma medida da elasticidade linear de um material. Uma das formas mais comuns de determinar esse módulo é por meio da observação da deformação de um material quando exposto a um esforço de tração. O módulo de Young oferece informações valiosas sobre as forças internas que mantêm as partículas de um corpo unidas. Quanto maior o valor do módulo de Young, mais rígido e resistente à deformação elástica é o material. Nota-se, na maioria dos resultados, que a inserção das nanoestruturas – tanto GO quanto AgNPs na emulsão acrílica aumentam o Módulo de Young, que é bem mais baixo na amostra EA – 6,89MPa, possivelmente por serem materiais com cadeias moleculares longas e flexíveis, o módulo de elasticidade é mais baixo, em comparação a outros materiais. Um fator que influencia é a presença de aditivos – além da densidade de entrelaçamento das cadeias moleculares e grau de cristalinidade. O maior valor apresentado é da amostra 2AgNP2GOE, com a presença do espessante (79,49 MPa), justificando a potencialidade das nanoestruturas como reforço na matriz polimérica para melhoria das propriedades mecânicas, e a sinergia das fases combinadas, assim como a presença do espessante que foi determinante no aumento do Módulo de Young. A amostra 2AgNP2GO apresentou o segundo maior valor (77,37 MPa), seguida da amostra EAGO (74,12 MPa), e da amostra EAAgNP (47,8 MPa). O módulo de Young da amostra 02AgNP1GO (10,05 MPa) foi baixo, mas ainda maior que o da amostra 1AgNP1GO (6,22 MPa), curiosamente. Isto pode ser devido a alguma aglomeração dos nanomateriais, não interagindo com as cadeias do polímero. Neste caso, conforme mencionado anteriormente, o alongamento foi significativamente maior,

mostrando que a amostra 1AgNP1GO tem uma capacidade maior de se alongar, sendo mais dúctil e flexível, e menos rígido, conforme mostra o baixo Módulo de Young. A amostra 2AgNP2GOE conta com a presença do espessante, o que diferentemente da amostra 2AgNP2GO, sem espessante, conferiu melhores propriedades mecânicas.

Esses resultados divergem do resultado do módulo de Young apresentado no ensaio por AFM, visto que, conforme já mencionado, o AFM atua em regiões extremamente pequenas, e relaciona-se com a dureza da sonda do equipamento. Se o material se apresenta heterogêneo, como no caso da amostra 2AgNP2GO, pode indicar um módulo menor. Já nos resultados do ensaio tensão-deformação pode-se observar o comportamento global do material.

Abaixo, na Tabela 6 o resumo dos resultados encontrados para cada amostra.

Tabela 6: Resumo dos resultados das médias das análises mecânicas para a emulsão acrílica e nanocompósitos

AMOSTRA	FORÇA APLICADA (N)	D. P.	TENSÃO MÁXIMA (MPa)	D. P.	ALONGAM. (%)	D. P.	TENSÃO DE ESCOAMENTO (MPa)	D. P.	MÓDULO YOUNG (MPa)
									ESCOAMENTO
A 02AgNP1GO	59,37	9,96	23,75	3,98	236,41	15,62	8,58	0,08	10,05
B 1AgNP1GO	58,09	0,32	23,23	0,13	373,91	33,22	8,50	0,02	6,22
C 2AgNP2GO	49,23	7,04	19,69	2,82	25,46	3,31	8,49	0,02	77,37
D 2AgNP2GOE	47,75	1,67	19,10	0,67	24,03	0,26	8,5	0,01	79,49
E EAGO	42,11	6,82	16,84	2,73	22,71	7,11	8,53	0,02	74,12
F EAAgNP	41,87	5,43	16,74	2,17	35,07	7,39	8,52	0,01	47,8
G EA	45,88	3,31	18,35	1,32	266,38	32,81	8,52	0,006	6,89

Fonte: A autora (2025)

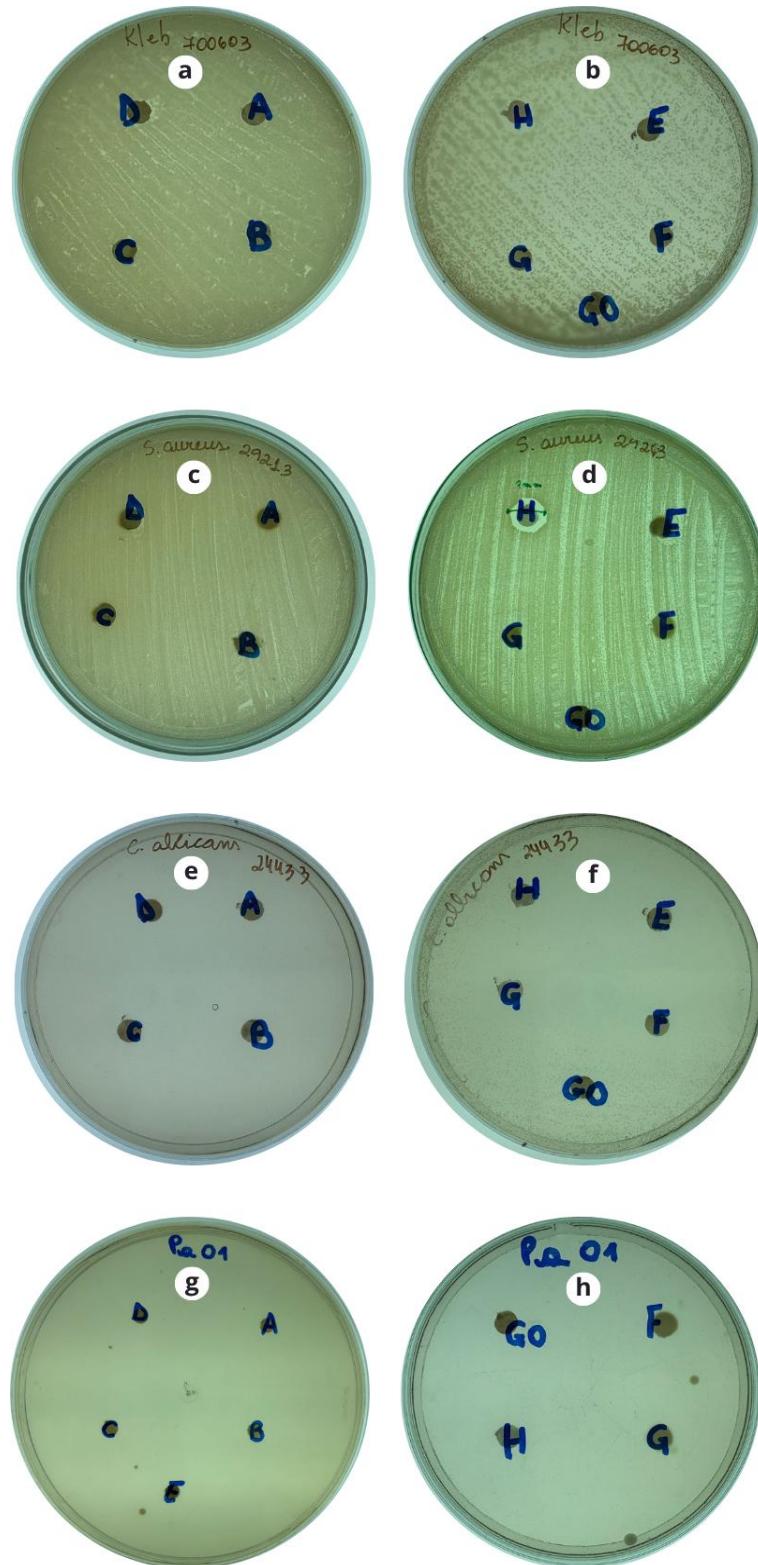
Conforme os resultados apresentados, a amostra 1AgNP1GO apresentou maior flexibilidade (menor módulo de Young), sendo uma característica importante para aplicação como pintura, mesmo em substratos que contraem ou expandem com a temperatura, evitando rachaduras e descascamentos, por exemplo. Por apresentar o maior valor, a amostra 2AgNP2GOE pode apresentar uma rigidez quanto à estas possíveis deformações. Ainda, a amostra 1AgNP1GO apresentou o maior alongamento, confirmando essa flexibilidade. Mesmo com a presença das nanoestruturas, o material permanece flexível o suficiente para a aplicação

proposta, mais ainda que a emulsão acrílica pura. Estudos a respeito das propriedades mecânicas em tintas utilizando AgNPs, de 0 a 0,35% em peso (Asafa *et al.*, 2021) demonstraram que a resistência à abrasão foi aprimorada em 236%, com 0,175% em peso, fornecendo resistência quanto à arranhões na superfície. Outro estudo, utilizando GO como reforço em tinta composta aquosa de PU demonstrou que o GO adicionado melhora significativamente as propriedades mecânicas, e o desgaste e dureza correspondentes melhoraram em 62,23%, 14,76% e 12,7%, respectivamente, em comparação com a amostra sem GO (Xu *et al.*, 2022). No estudo desta pesquisa, buscou-se avaliar a sinergia entre os dois componentes – GO e AgNPs na melhoria das propriedades da emulsão acrílica. Nota-se que a presença isolada dos reforços na matriz – EAGO e EAAGNPs aumenta o módulo de Young (deixando mais rígido) e diminui o alongamento, porém a amostra com os dois componentes em proporções intermediárias – 1AgNP1GO proporciona, conforme mencionado anteriormente, uma maior flexibilidade e alongamento do material. Em contrapartida, a maior força aplicada foi encontrada na amostra 02AgNP1GO, com menor quantidade de nanopartículas de prata, assim como apresentou a maior tensão máxima aplicada e maior tensão de escoamento. Testes de abrasão deverão ser feitos em estudos futuros para comprovar o benefício da incorporação destes reforços na tinta.

### **6.2.7 Análises microbiológicas**

Os resultados das análises microbiológicas, seguindo a técnica de disco-difusão, apresentaram resultados negativos em atividades antimicrobianas para as amostras dos nanocompósitos e para a emulsão acrílica pura, tanto para as 3 bactérias testadas – *Klebsiella* (imagens a e b) *S. aureus* (imagens c e d), e *P. aeruginosa* (imagens g e h), quanto para o fungo *C. albicans* (imagens e e f).

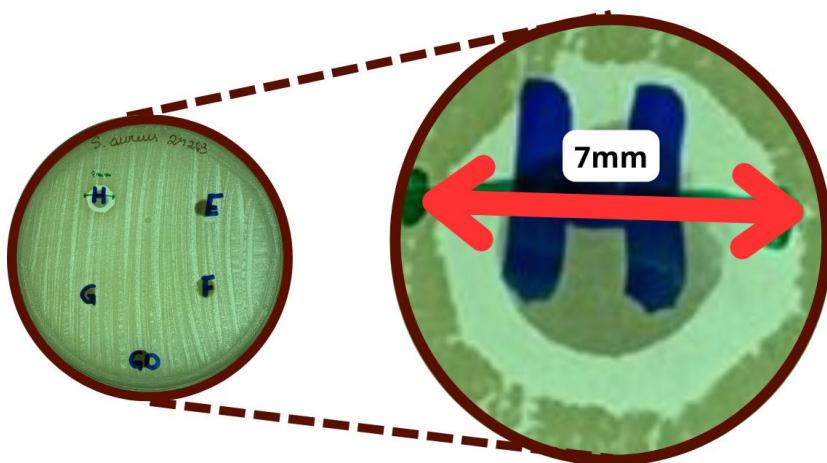
Figura 42: Análises microbiológicas. Imagens a e b – *Klebsiella*, imagens c e d - *S. aureus*, imagens g e h - *P. aeruginosa* (bactérias) e imagens e e f - *C. albicans* (fungo)



Fonte: A autora (2025)

Alguma atividade antimicrobiana foi notada medindo-se o diâmetro das zonas inibitórias ao redor da amostra AgNPs - nanopartículas de prata isoladas, mostrando 7 mm de diâmetro da supressão do crescimento microbiano, apenas para a bactéria *S. aureus*.

Figura 43: Diâmetro da supressão do crescimento microbiano para a bactéria *S. aureus* ao redor da amostra de AgNPs.



Fonte: A autora (2025)

Embora as AgNPs sejam conhecidas por sua atividade antimicrobiana, como pode-se observar no resultado acima, sua eficácia em nanocompósitos poliméricos pode ser comprometida por alguns fatores, tais como: Agregação das nanopartículas, o que pode causar uma redução na área de contato com os microrganismos se sua dispersão na matriz não estiver adequada; Isolamento das nanopartículas pelo próprio polímero, impedindo a liberação de íons prata; oxidação das AgNPs, pela exposição ao ar ou à umidade; ou até mesmo uma concentração insuficiente no compósito. Algumas estratégias, como no estudo de Assis (2021), mostraram que a dispersão das AgNPs em matrizes de sílica antes da incorporação no polímero, ajudam a evitar a aglomeração e assim promover a liberação de íons.

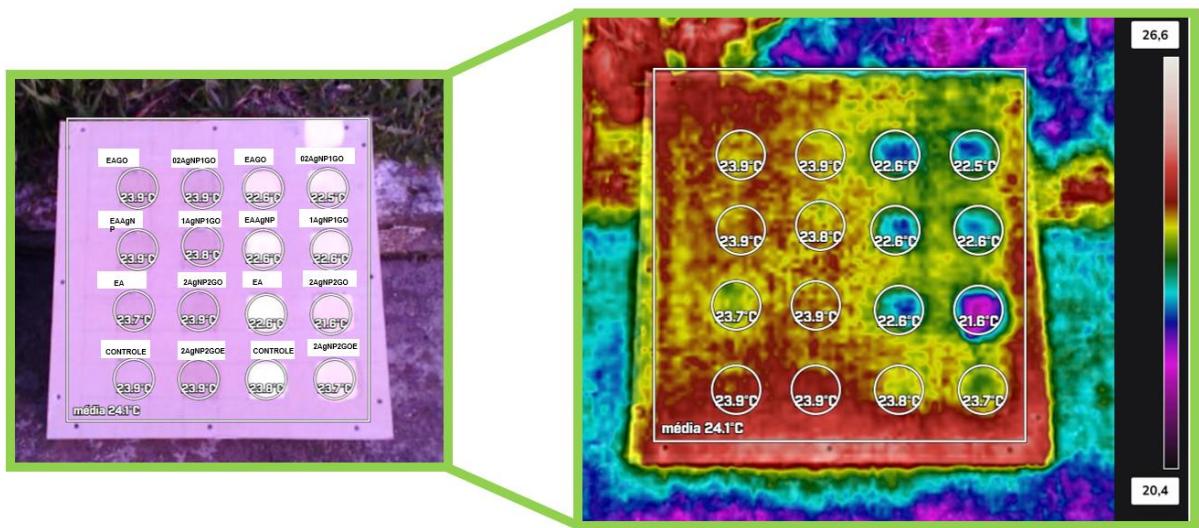
#### 6.2.8 Análise termográfica

Foram realizadas análises termográficas das pinturas somente com as amostras dos nanocompósitos direto no substrato, das pinturas somente com tinta

branca comercial e da amostra com os nanocompósitos sobre a tinta comercial, conforme apresentados nas imagens a seguir.

As medições de temperatura no horário das 15 h dos revestimentos das amostras em substrato direto (2 demões - amostras à esquerda), variam entre 23,7 °C e 23,9 °C. Nota-se no termograma apresentado que, pintadas direto no substrato cimentício, sem a tinta-base, acontece uma discreta diminuição da temperatura em comparação com a temperatura da chapa e da referência (sem revestimento), que apresenta 24,1°C (média). Na amostra com apenas a tinta comercial, a temperatura reduziu, também de uma forma discreta, para 23,8 °C, em comparação com a temperatura média da placa do substrato. Já nas amostras contendo os nanocompósitos em cima da tinta comercial, pode-se observar uma variação maior na temperatura, sendo a amostra 2AgNP2GO a que mais apresentou diminuição da temperatura, chegando a 21,6 °C (Figura 44).

Figura 44: Primeira medição de temperatura superficial com câmera termográfica – 15h

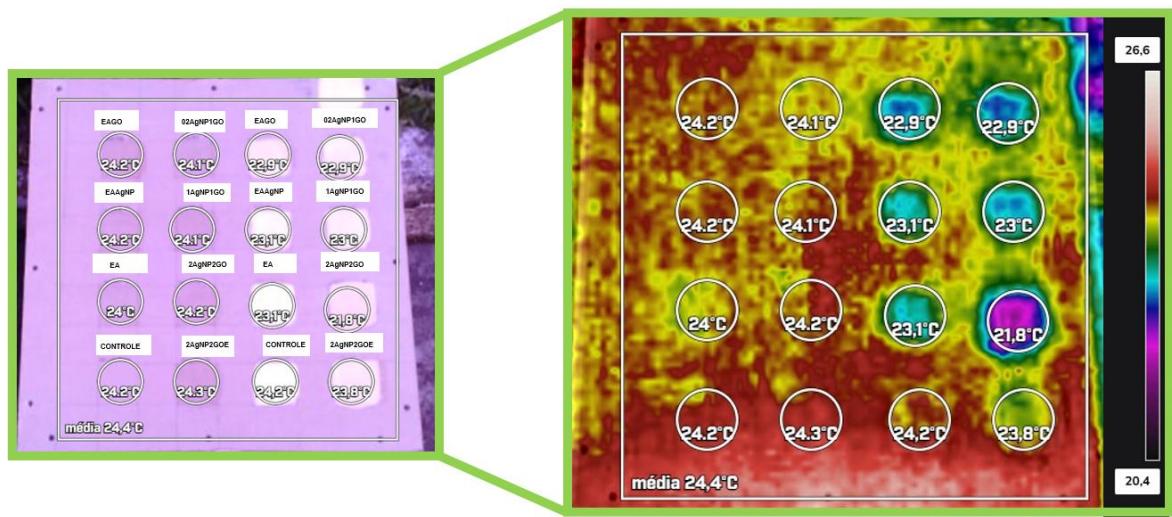


Fonte: A autora (2025)

As medições de temperatura no horário das 15:30 h dos revestimentos das amostras em substrato direto (2 demões - amostras à esquerda), variam entre 24 °C e 24,3 °C, apresentando mínima redução de temperatura quando comparadas à média da temperatura direto no substrato, de 24,4 °C. Na amostra com apenas a tinta comercial, a temperatura foi reduzida para 24,2 °C, em comparação com a temperatura média da placa do substrato. Após esse tempo nas amostras contendo

os nanocompósitos sobre a tinta comercial, a mesma diferença na variação da temperatura aconteceu com mais intensidade na amostra 2AgNP2GO, alcançando 21,8 °C (Figura 45)

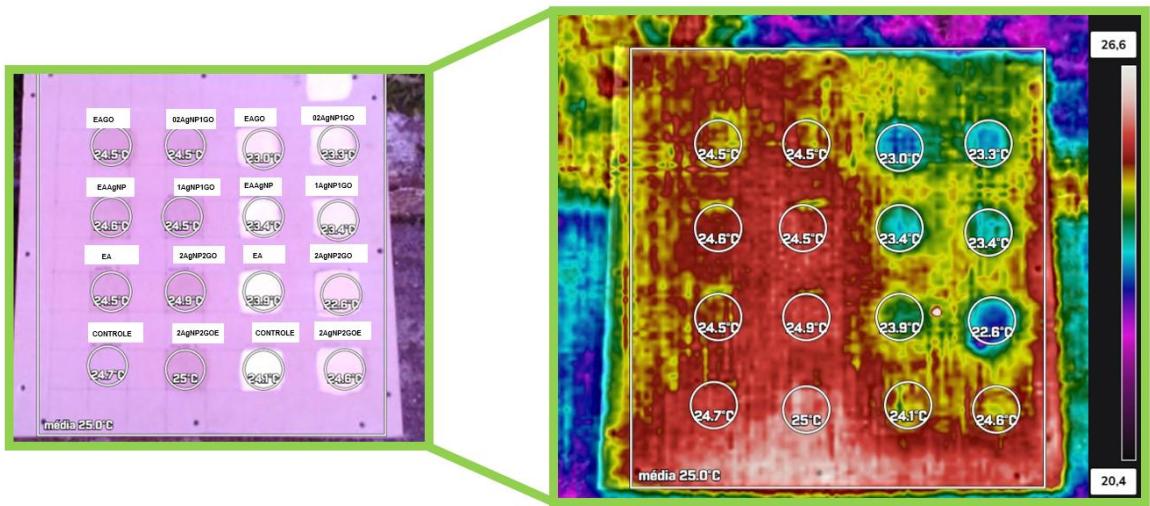
Figura 45: Primeira medição de temperatura superficial com câmera termográfica – 15h30



Fonte: A autora (2025)

No horário das 16 h, as medições de temperatura dos revestimentos das amostras em substrato direto (2 demões - amostras à esquerda), variam entre 24,5°C e 25°C, apresentando em uma das amostras (2AgNP2GOE), a mesma temperatura (média) do substrato, de 25 °C. Na amostra com apenas a tinta comercial, a temperatura permaneceu reduzida para 24,1 °C, e nas amostras contendo os nanocompósitos sobre a tinta, a maior redução de temperatura seguiu na amostra 2AgNP2GO, alcançando, após esse tempo de 1 h após a primeira leitura, 22,6 °C, apresentando uma diferença significativa de 2,4 °C em relação à temperatura do substrato (Figura 46).

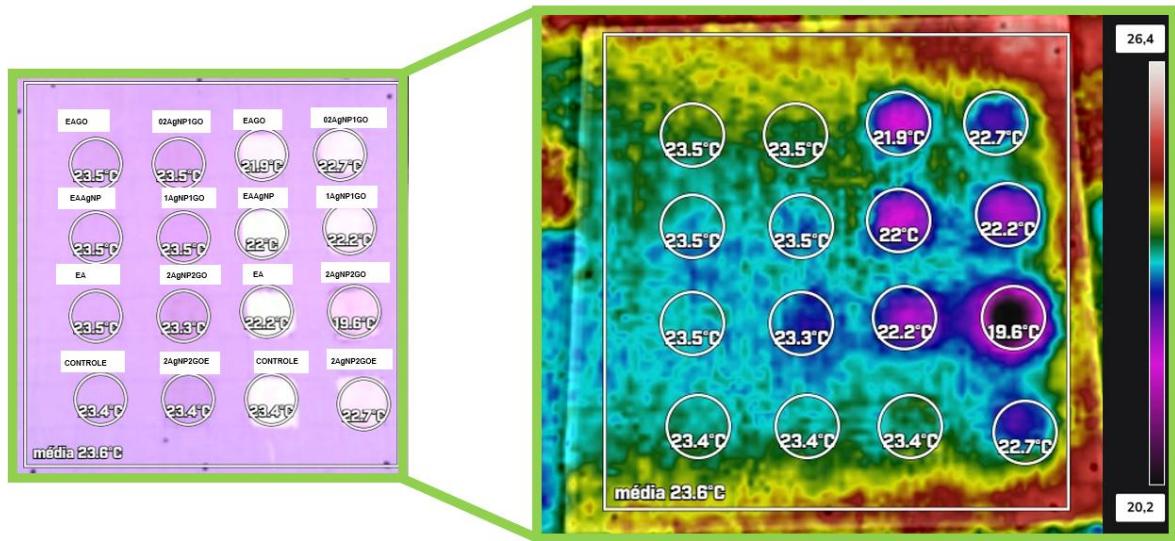
Figura 46: Primeira medição de temperatura superficial com câmera termográfica – 16h



Fonte: A autora (2025)

Foram repetidos os testes em uma nova placa de substrato, para avaliação termográfica das pinturas, em mesmo local e horário. Os resultados foram muito similares à primeira aplicação, como pode-se observar nas imagens termográficas abaixo. Na leitura realizada às 15 h, a média de temperatura ambiente no substrato apresentou 23,6 °C, e as amostras contendo apenas os nanocompósitos diretamente no substrato apresentaram valores de temperatura entre 23,3 °C e 23,5 °C. A leitura da temperatura somente da tinta comercial foi de 23,4 °C, apresentando pouca diferença. Quanto aos nanocompósitos sobre a tinta, novamente a amostra 2AgNP2GO apresentou o menor valor de temperatura, chegando a 19,6 °C, chegando a 4 °C de diferença. As demais amostras também tiveram redução de temperatura, em menor percentual.

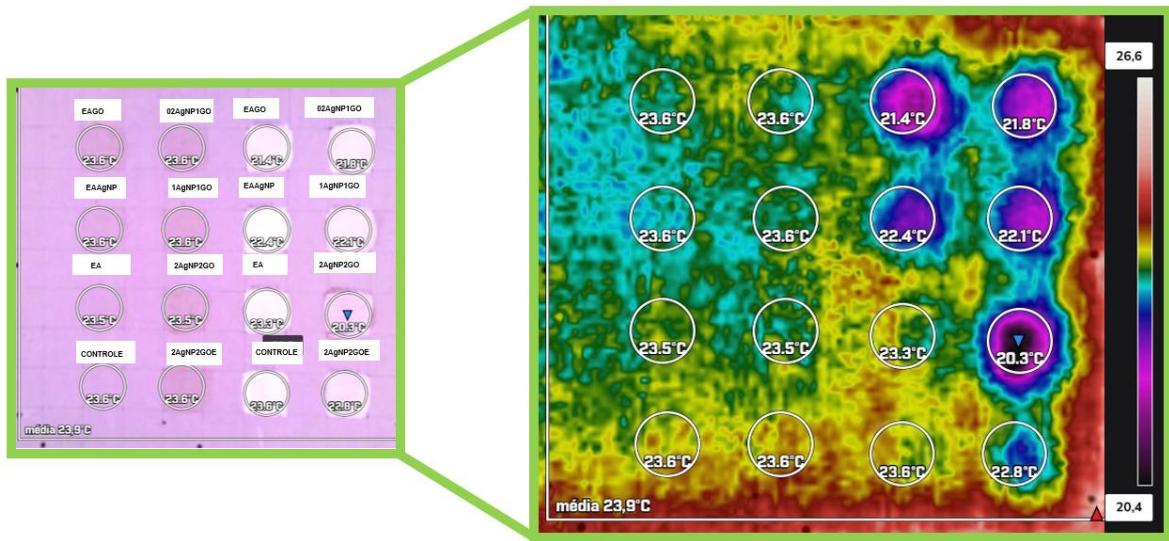
Figura 47: Segunda medição de temperatura superficial com câmera termográfica – 15h



Fonte: A autora (2025)

Na última leitura realizada às 16 h, a média de temperatura ambiente no substrato apresentou 23,9 °C. Os valores de temperatura das amostras contendo apenas os nanocompósitos diretamente no substrato foram entre 23,5 °C e 23,6 °C. A leitura da temperatura somente da tinta comercial foi de 23,6 °C, indicando que, assim como as amostras somente com os nanocompósitos no substrato não apontam diferença significativa na redução de temperatura, visto que a temperatura do substrato é uma média de valores. Já as amostras com nanocompósitos sobre a tinta, corroborando os resultados anteriores, a amostra 2AgNP2GO foi a que apresentou maior diferença de temperatura, com 3,6 °C de redução em comparação com a média da temperatura do substrato (Figura 48).

Figura 48: Segunda medição de temperatura superficial com câmera termográfica – 16h



Fonte: A autora (2025)

Os resultados mais promissores foram observados quando o nanocompósito foi aplicado sobre a tinta comercial, e não diretamente sobre o substrato cimentício. Isso pode ocorrer devido a alguns fatores, como a microtextura da tinta base, que pode dispersar melhor a luz, assim como os ligantes presentes auxiliam na distribuição dos nanomateriais. A tinta também pode funcionar como uma barreira térmica, permitindo maior retenção e emissão de calor.

No estudo de Roy *et al.*, (2020), foram desenvolvidos revestimentos flexíveis de GO, denominados GOCs, com o objetivo de funcionar como absorvedor térmico para melhoria de conforto em edificações (GO + material de mudança de fase + substrato), e mostraram um material com potencial para dissipação do calor, sendo promissor para o gerenciamento térmico de pontos quentes no que se refere ao conforto térmico de edificações. Os autores atribuem a emissividade maior, além da maior área de superfície que o GO possui, facilitando a dissipação de calor. Isso mostra a possibilidade de o revestimento atuar como estratégia de aquecimento passivo. Ainda, para as análises térmicas, para as quais foi utilizada uma câmera de imagem térmica infravermelha (IR), os autores constataram que, em temperaturas baixas, a leitura da temperatura na parte do revestimento foi maior ( $10,3^{\circ}\text{C}$ ) do que a temperatura externa ( $4,8^{\circ}\text{C}$  e  $7,6^{\circ}\text{C}$ ). Já a leitura em

temperaturas altas, o local com revestimento apresentou valores menores de temperatura ( $48,2^{\circ}\text{C}$ ) do que a parte externa ( $50,3^{\circ}\text{C}$  e  $60^{\circ}\text{C}$ ), isso mostra que a proposta dos autores deste revestimento utilizando o GO foi promissor em manter uma temperatura interna mais confortável.

As nanopartículas de prata também foram alvo do estudo de Pradeep *et al.*, (2021) utilizadas em fração de massa de 0,05 % e 0,1 %, como adição em materiais de mudança de fase (cera de parafina), e tiveram resultados promissores para o aumento da capacidade de armazenamento de energia térmica dos materiais. Sua principal contribuição está na alta condutividade térmica, que permite acelerar a taxa de absorção e liberação de calor durante os ciclos de fusão e solidificação dos PCMs. Ainda, possibilita a distribuição uniforme de calor quando bem dispersas na matriz do material.

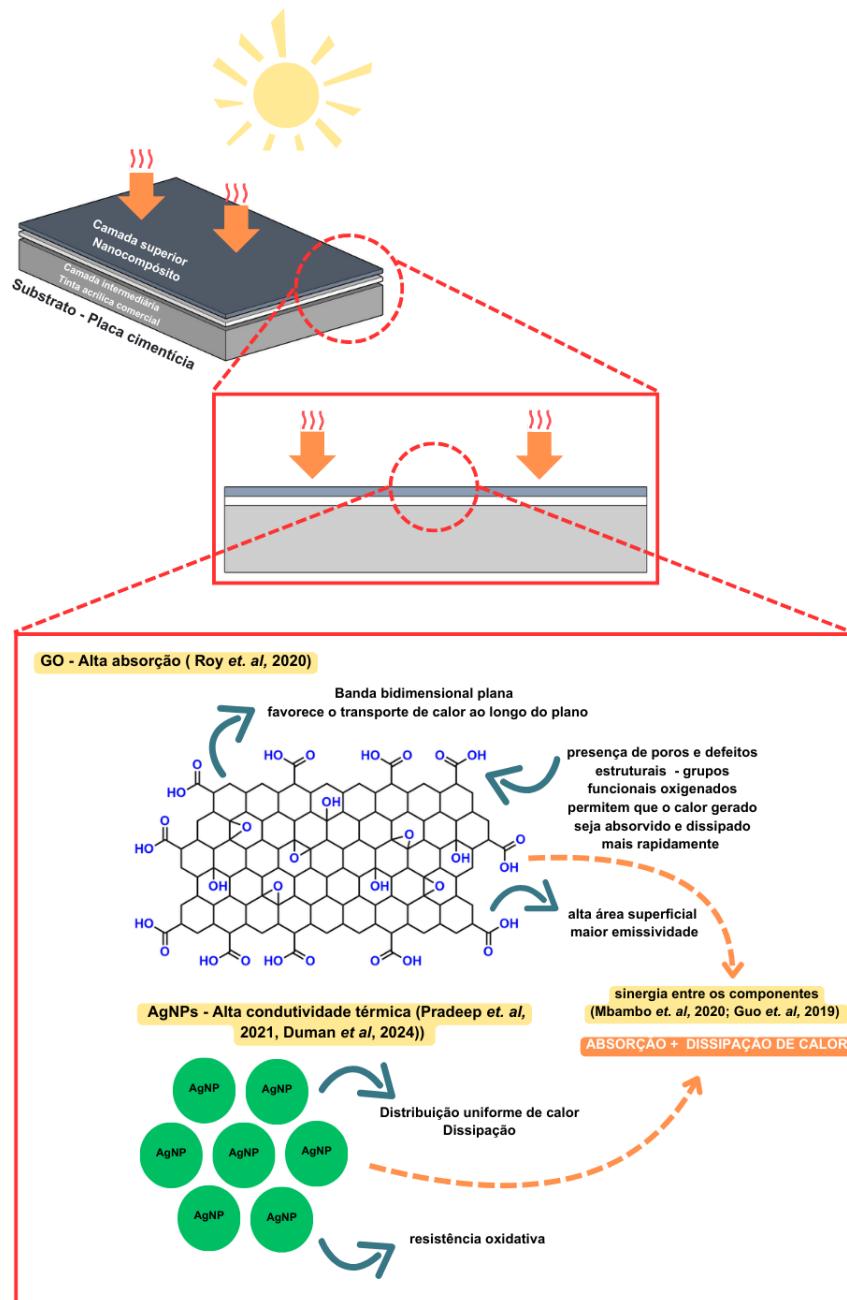
Com uma proposta semelhante, mas utilizando ouro, o estudo de Mbambo e colaboradores (2020) explorou o aumento da condutividade térmica em nanofluídos formulados com folhas de grafeno decoradas com nanopartículas de ouro (Au), dispersas em etilenoglicol. Os autores concluíram que a incorporação das nanopartículas de ouro na estrutura do grafeno promove uma rede altamente eficiente para condução de calor, devido à sinergia entre a alta condutividade térmica do grafeno e as propriedades térmicas e eletrônicas do ouro. Além disso, segundo os autores, essa variação da condutividade térmica com a temperatura também é atribuída ao movimento browniano das nanopartículas.

O trabalho desenvolvido por Guo *et al.* (2019) investigou a melhoria da condutividade térmica em nanocompósitos de poliimida por meio da incorporação de nanopartículas de prata ancoradas em óxido de grafeno reduzido (Ag/rGO). Os autores desenvolveram um material com estrutura heterogênea capaz de dissipar calor de forma mais eficiente. Os resultaram mostraram, dentre outras propriedades, o aumento da condutividade térmica e resistência térmica, e validaram através de imagens infravermelhas e modelagem teórica. Os resultados da imagem infravermelha mostraram uma melhor dissipação de calor, onde os nanocompósitos com maior concentração de Ag/rGO apresentaram temperaturas superficiais mais uniformes e mais baixas, indicando que o calor foi distribuído de forma mais eficiente. A imagem ainda mostrou que os materiais com Ag/rGO dissipam o calor mais rapidamente do que os compósitos sem carga ou com carga

convencional, mostrando que os dois materiais trabalham em sinergia, validando desta forma, os resultados alcançados nesta pesquisa até o momento.

Neste trabalho, buscou-se utilizar os dois materiais de reforço – GO e AgNPs em sinergia. O mecanismo proposto está descrito na Figura 49 abaixo, de acordo com as informações obtidas através dos ensaios realizados, mostrando a tendência de comportamento, assim corroborando com a literatura aqui mencionada.

Figura 49: Proposta de mecanismo



Fonte: A autora (2025)

Entende-se que, por sua estrutura, o GO não é considerado condutor térmico (seus grupos funcionais interferem na estrutura eletrônica), porém tem capacidade de absorver o calor. Isso se deve à sua alta área superficial, assim como a interação com a radiação térmica em determinados intervalos de comprimentos de onda no infravermelho. Outros trabalhos da literatura também avaliaram as propriedades térmicas de compósitos utilizando AgNPs (Duman, 2024; Jouni *et al.*, 2013; Silva *et al.*, 2022) comprovando a sua eficiência na condutividade térmica, muito em função da sua alta relação área de superfície/volume, transferência eficiente de calor por fônon e elétrons, que é auxiliada pelo pequeno tamanho das partículas além da resistência oxidativa, sendo um material potencial para aplicação em revestimento como tintas.

## 7 Impactos esperados

O projeto procurou desenvolver nanocompósitos com características antimicrobianas e de controle térmico, com possibilidade de utilização como alternativa para revestimento da construção civil. Abaixo na Figura 50, o esquema ilustrativo da pesquisa apresentada.

Figura 50: Esquema ilustrativo dos objetivos da pesquisa



Fonte: A autora (2025)

Pesquisas anteriores já apontaram benefícios da utilização de AgNPs em função de seu efeito bactericida (Ahmad, 2020), inclusive em matrizes poliméricas (Silva, 2020), assim como trabalhos relacionados a produção de tintas térmicas com o objetivo de controlar a demanda energética das edificações, como a aplicação de tintas e revestimento reflexivos infravermelhos (Malz *et al.*, 2020), ou utilizando partículas de aerogel de sílica (Nguyen, 2020).

Neste trabalho, propusemos a combinação das nanopartículas de prata (AgNPs) com óxido de grafeno (GO). O GO apresenta propriedades relevantes (mecânicas, térmicas, entre outras), além das suas características anfifílicas, com seus grupos epóxi e hidroxila na superfície sendo mostrado uma alternativa por Roy *et al.*, (2020), em seu trabalho sobre revestimento flexível de GO serigrafado, implementando-o como absorvedor térmico com a finalidade de auxiliar na melhoria do conforto térmico em edifícios.

Neste sentido, este projeto visou desenvolver um material nanocompósito formado por nanopartículas de prata e GO (cargas), e látices poliméricos (matriz). Os resultados mostraram o possível efeito sinérgico do GO e das AgNPs quanto à melhoria de propriedades, inclusive térmicas.

## 8 Conclusões

A presente pesquisa atingiu os objetivos propostos, onde foram utilizadas rotas ambientalmente amigáveis para desenvolver nanocompósitos poliméricos multifuncionais à base de látex acrílico, GO e AgNPs para possível utilização como revestimento na construção civil. Os resultados obtidos demonstram que o material desenvolvido — de baixo custo, com fácil reprodução e escalabilidade — apresenta algumas propriedades promissoras para a aplicação pretendida.

As amostras comprovaram a eficiência da síntese dos materiais precursores, assim como dos nanocompósitos após a otimização do processo experimental.

As imagens obtidas via MEV mostraram compatibilidade entre a matriz e as nanoestruturas. Os resultados alcançados por AFM mostraram que uma maior concentração das nanopartículas proporciona uma maior rugosidade – fator positivo no que se refere ao contato do revestimento com o substrato. As amostras dos nanocompósitos ainda apresentaram maior adesividade e menor dureza, ou seja, maior flexibilidade em relação à matriz pura. Quanto à rigidez, em sua maioria as amostras foram mais rígidas que o material base. Os resultados de FTIR comprovaram que a incorporação das nanoestruturas não alterou significativamente a estrutura da matriz polimérica.

Em relação às análises mecânicas – ensaio tensão/deformação – a maioria das amostras apresentou um maior módulo de Young (maior rigidez) que a matriz pura, exceto a amostra 1AgNP1GO, a qual apresentou um valor menor, apresentando maior flexibilidade e absorção de impacto.

Nas análises microbiológicas não foram identificadas atividades antimicrobianas e antifúngicas dos nanocompósitos, o que pode ser devido a fatores como concentração, aglomeração ou isolamento pelo polímero, pois as AgNPs puras apresentaram alguma atividade.

As análises de temperatura superficial através da câmera termográfica apontaram uma diferença de até - 4°C da amostra 2AgNP2GO quando comparado à tinta comercial e às demais amostras. A diminuição da temperatura deste nanocompósito – com maior concentração de GO e de AgNPs (sem a presença do espessante), pode ser um indicativo que a alta absorção e emissividade destes materiais podem ser uma alternativa para auxílio no desempenho térmico de edificações, onde o calor absorvido pode não estar sendo transmitido para a

superfície, estando “isolado termicamente”, tendo efeito sinérgico destes dois nanomateriais,

Esta pesquisa desenvolveu um estudo de um revestimento de baixo custo e escalonável utilizando nanomateriais como GO e AgNPs como reforços em emulsão acrílica mostrando a possibilidade de utilização como revestimento na construção civil, melhorando sua eficiência térmica.

## 9 Estudos futuros

- Verificar o comportamento reológico das amostras preparadas. Tais análises serão conduzidas utilizando o viscosímetro rotacional modelo 35SA / SR12 da Fann Instrument Company, disponível no Laboratório de Tecnologia de Bioprocessos da Universidade Federal de Pelotas (UFPel). O objetivo é caracterizar as propriedades viscoelásticas dos nanocompósitos e avaliar sua estabilidade.
- A condutividade térmica dos filmes será medida por meio da técnica de termorrefletância, visando maior precisão na caracterização térmica dos nanocompósitos. Essa análise será complementada por testes de eficiência térmica em protótipos reais de edificações, permitindo validar o desempenho dos materiais em condições práticas.
- Será realizada simulação computacional da eficiência térmica em diferentes zonas bioclimáticas brasileiras, utilizando o software *EnergyPlus*, com o intuito de prever o comportamento dos materiais em cenários climáticos diversos e otimizar seu uso em construções sustentáveis.
- Por fim, será desenvolvido o aprimoramento da rota de síntese das nanopartículas de prata (AgNPs), com foco na obtenção de partículas com diâmetro inferior a 10 nm. Novos testes microbiológicos serão realizados para avaliar o desempenho antimicrobiano dos nanocompósitos com as partículas otimizadas.

## Referências Bibliográficas

- ABDULLAH, S. N. et al. *Bio-Nanocomposite Coating for Passive Cooling Optimisation and its Thermal Performance Assessment*. Preprint, SSRN, 2024. Disponível em: SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4830795> ou <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4830795>.
- ABREU, M. C. C.; SILVA, A. A. P. Análise de manifestações patológicas através da termografia por infravermelho – estudo de caso nos edifícios da Universidade do Gurupi – TO. *Revista Científica Semana Acadêmica*, Fortaleza, CE, v. 12, ed. 250, 2024. ISSN 2236-6717. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.35265/2236-6717-250-13039>. Acesso em: 04 fev. 2025.
- AGUILAR, M. T. P. et al. Compostos geopoliméricos: uma contribuição para a sustentabilidade do Design do Conforto Térmico. In: *Encontro de Sustentabilidade em Projeto – ENSUS*, IX, 2021, Florianópolis. Anais [...]. Florianópolis: UFSC, 2021. p. 212–226. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/228949>. Acesso em: 10 set. 2022.
- AHMAD, S. A. et al. Bactericidal activity of silver nanoparticles: a mechanistic review. *Materials Science for Energy Technologies*, [S. I.], v. 3, p. 756–769, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589299120300501>. Acesso em: 14 jul. 2021.
- AKHAVAN, O.; GHADERI, E. Toxicity of graphene and graphene oxide nanowalls against bacteria. *ACS Nano*, [S. I.], v. 4, n. 10, p. 5731–5736, 2010. Disponível em: [https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/nn101390x?casa\\_token=GcEFLY40PQAAAAA%3ALxDePRymP4kjKLMZJxnTFv1uQbMPp\\_hIBqEJ\\_xl2NZTueGITUp8IOlBe9jZdkgiVbjp0yT7SLs6pg4](https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/nn101390x?casa_token=GcEFLY40PQAAAAA%3ALxDePRymP4kjKLMZJxnTFv1uQbMPp_hIBqEJ_xl2NZTueGITUp8IOlBe9jZdkgiVbjp0yT7SLs6pg4). Acesso em: 10 out. 2022.
- ALDANA-RODRÍGUEZ, D.; LOZANO-TAFUR, C. Análisis energético de edificios, mediante termografía infrarroja aplicada con un dron cuadricóptero Parrot Anafi thermal. *Tecnura*, Bogotá, v. 27, n. 78, p. 157–171, 2023. Disponível em: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123921X2023000400157&script=sci\\_artext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123921X2023000400157&script=sci_artext). Acesso em: 04 fev. 2025.
- ALIERO, A. S. et al. Bibliometric exploration of green synthesized silver nanoparticles for antibacterial activity. *Emerging Contaminants*, [S. I.], v. 11, n. 1, p. 100411, 2025.
- AL-MARHABY, F. A. et al. Preparation and characterization of silver nanoparticles and their use in catalytic reduction of 4-Nitrophenol. *World Journal of Nano Science and Engineering*, [S. I.], v. 6, n. 1, p. 29, 2016. Disponível em: [https://www.scirp.org/html/3-4400226\\_64208.htm?pagespeed=noscript](https://www.scirp.org/html/3-4400226_64208.htm?pagespeed=noscript). Acesso em: 5 ago. 2022.

ALFARAWI, S. et al. Thermal Performance Assessment of External Wall Construction for Energy-Efficient Buildings. *European Journal of Sustainable Development Research*, [S. I.], v. 6, n. 3, p. em0189, 2022. Disponível em: <https://www.ejosdr.com/article/thermal-performance-assessment-of-external-wall-construction-for-energy-efficient-buildings-12039>. Acesso em: 2 out. 2022.

ALGHRAIRI, N. et al. Improvement of Concrete Characterization Using Nanomaterials: State-of-the-Art. *Journal of Engineering*, [S. I.], v. 2025, n. 1, p. 8027667, 2025.

ALI, A.; ISSA, A.; ELSHAER, A. A comprehensive review and recent trends in thermal insulation materials for energy conservation in buildings. *Sustainability*, [S. I.], v. 16, n. 20, p. 8782, 2024.

ALTOÉ, L.; OLIVEIRA FILHO, D. Termografia infravermelha aplicada à inspeção de edifícios. *Acta Tecnológica*, [S. I.], v. 7, n. 1, p. 55–59, 2012. Disponível em: <https://periodicos.ifma.edu.br/index.php/actatecnologica/article/view/113/97>. Acesso em: 04 fev. 2025.

AN, L. et al. Reflective paint consisting of mesoporous silica aerogel and titania nanoparticles for thermal management. *ACS Applied Nano Materials*, [S. I.], v. 4, n. 6, p. 6357–6363, 2021. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acsanm.1c01280>. Acesso em: 10 jan. 2022.

ARUN, T. et al. Facile synthesized novel hybrid graphene oxide/cobalt ferrite magnetic nanoparticles based surface coating material inhibit bacterial secretion pathway for antibacterial effect. *Materials Science and Engineering: C*, [S. I.], v. 104, p. 109932, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0928493119306502>. Acesso em: 10 fev. 2022.

ASAFA, T. B. et al. Physico-mechanical properties of emulsion paint embedded with silver nanoparticles. *Bulletin of Materials Science*, [S. I.], v. 44, n. 1, p. 7, 2021.

ASSIS, M. et al. PVC-SiO<sub>2</sub>-Ag composite as a powerful biocide and anti-SARS-CoV-2 material. *Journal of Polymer Research*, [S. I.], v. 28, n. 9, p. 361, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 15575-1 – Edificações habitacionais — Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais*. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. 71 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 15220-2 – Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações*. Rio de Janeiro, 2005. 34 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15220-3 – Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005. 30 p.

BARASUOL, F. *Nanocompósitos de borracha natural e nanoestruturas de carbono visando aplicação como geradores triboelétricos*. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Pampa, Bagé.

BARRIOS, S. *Manual descomplicado de tecnologia de tintas: um guia rápido e prático para formulação de tintas e emulsões*. São Paulo: Editora Blucher, 2017. ISBN 9788521212454. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521212454/>. Acesso em: 31 jul. 2022.

BENEDITO, A.; SILVA, F.; SANTOS, I. Nanopartículas de prata: aplicações e impacto ambiental. *Revista Acadêmica Oswaldo Cruz*, [S. I.], v. 16, p. 4–5, 2017. Disponível em: [https://oswaldocruz.br/revista\\_academica/content/pdf/Edicao\\_16\\_BENEDITO\\_Alin\\_e\\_de\\_Souza.pdf](https://oswaldocruz.br/revista_academica/content/pdf/Edicao_16_BENEDITO_Alin_e_de_Souza.pdf). Acesso em: 6 fev. 2022.

BERNARDO, L. M. *Aplicação de concretos especiais com sílica coloidal como material de reparo de estruturas de concreto*. 2024. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

BOCATE, K. P. et al. Antifungal activity of silver nanoparticles and simvastatin against toxicogenic species of Aspergillus. *International Journal of Food Microbiology*, [S. I.], v. 291, p. 79–86, 2019.

BOGO, A. et al. *Bioclimatologia aplicada ao projeto de edificações visando o conforto térmico*. Florianópolis: UFSC, 1994. Relatório interno. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Claudio-Pietrobon/publication/263046213\\_RELATORIO\\_DE\\_PESQUISA\\_-RP\\_02-1994-BIOCLIMATOLOGIA/links/0deec539a08c60a29d000000/RELATORIO-DE-PESQUISA-RP-02-1994-BIOCLIMATOLOGIA.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Claudio-Pietrobon/publication/263046213_RELATORIO_DE_PESQUISA_-RP_02-1994-BIOCLIMATOLOGIA/links/0deec539a08c60a29d000000/RELATORIO-DE-PESQUISA-RP-02-1994-BIOCLIMATOLOGIA.pdf). Acesso em: 5 mai. 2022.

BOKOBZA, L. Mechanical and electrical properties of elastomer nanocomposites based on different carbon nanomaterials. C—*Journal of Carbon Research*, [S. I.], v. 3, n. 2, p. 10, 2017. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2311-5629/3/2/10/htm>. Acesso em: 8 out. 2022.

BUENO, M. J. *Propriedades eletrônicas de grafeno com defeitos*. 2011. Tese (Doutorado em Física) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

BUENO, R. M. *A influência do óxido de grafeno e da sílica coloidal nas propriedades químicas e mecânicas de matrizes cimentícias*. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade São Judas, São Paulo. Disponível em:

<https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/13030>. Acesso em: 13 jul. 2021.

BUI, H. T. T.; HOANG, A. N.; LE, C. M. Study on the Effect of Graphene on Characteristics of Inorganic Polymer Paint. *ACS Omega*, [S. I.], v. 10, n. 6, p. 5503–5516, 2025.

CALLISTER, W. D. *Ciência e Engenharia dos Materiais: uma introdução*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CAPUTO, A. et al. A Bilayer Micro/Nanostructured Water-Based Paint With Effective Thermal Insulating and Reflective Properties. *Advanced Materials Interfaces*, [S. I.], v. 12, n. 10, p. 2400859, 2025.

CATARINA, G. A. S. *Desenvolvimento de tintas em pó ignífugas à base de resina acrílica com adição das argilas montmorilonita e mica moscovita*. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul. Disponível em: <https://repositorio.ucs.br/handle/11338/1082>. Acesso em: 10 jul. 2021.

CHIHAB, Y. et al. Thermal inertia and energy efficiency enhancements of hollow clay bricks integrated with phase change materials. *Journal of Building Engineering*, [S. I.], v. 53, p. 104569, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710222005824>. Acesso em: 1 out. 2022.

COBOS, M. et al. Graphene oxide–silver nanoparticle nanohybrids: Synthesis, characterization, and antimicrobial properties. *Nanomaterials*, [S. I.], v. 10, n. 2, p. 376, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-4991/10/2/376>. Acesso em: 4 jul. 2022.

CORSO, M. et al. Incorporation of graphene oxide in coating mortar: a sustainable view. *Ambiente Construído*, [S. I.], v. 20, n. 1, p. 297–312, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/SBQ7Y86JZgQWNcKfTzkLcCk/?lang=pt>. Acesso em: 10 jul. 2021.

CRANE, M. J.; DEVINE, S.; JAMIESON, A. Graphene oxide/silver nanoparticle ink formulations rapidly inhibit influenza A virus and OC43 coronavirus infection in vitro. *bioRxiv*, [S. I.], 2021. Disponível em: <https://www.biorxiv.org/content/biorxiv/early/2021/02/26/2021.02.25.432893.full.pdf>. Acesso em: 1 ago. 2022.

CUONG, T. V. et al. Photoluminescence and Raman studies of graphene thin films prepared by reduction of graphene oxide. *Materials Letters*, [S. I.], v. 64, n. 3, p. 399–401, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167577X09008775>. Acesso em: 15 jun. 2022.

DAS, M. R. et al. Synthesis of silver nanoparticles in an aqueous suspension of graphene oxide sheets and its antimicrobial activity. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, [S. I.], v. 83, n. 1, p. 16–22, 2011. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927776510005989?casa\\_toke\\_n=FYrX-wJ-H68AAAAA:wMzxIYkXfFrgrBD3cnjTTOxB5BEctYlc1WCT3g9otPcCY-gx4cWISK3fEB6ZhpgDE0TxTZn-w](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927776510005989?casa_toke_n=FYrX-wJ-H68AAAAA:wMzxIYkXfFrgrBD3cnjTTOxB5BEctYlc1WCT3g9otPcCY-gx4cWISK3fEB6ZhpgDE0TxTZn-w). Acesso em: 6 mai. 2022.

DE ALMEIDA, J. R. et al. *Sustentabilidade Ambiental*. [S. I.]: AYA Editora, 2025.

DE BRITO, E. C. P. et al. Quantification of silver nanoparticles in a pharmaceutical product by spectrophotometry and potentiometry: a proposal for practical classes in analytical chemistry. *Química Nova*, [S. I.], v. 44, p. 105–111, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/6Hb4XYR3YQjykff8Lvdzsh/abstract/?lang=en&format=html>. Acesso em: 10 mar. 2022.

DE FARIA, A. F. et al. Anti-adhesion and antibacterial activity of silver nanoparticles supported on graphene oxide sheets. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, [S. I.], v. 113, p. 115–124, 2014. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927776513005110?casa\\_toke\\_n=RDHxtLRkfn8AAAAA:m3CNPuldH2R05iCgkBhv9ADtlhDOi90cFJC71u3dXXsJ6G5IJ9nclEEeJ-WjlaFJf6Kw1Cirw](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927776513005110?casa_toke_n=RDHxtLRkfn8AAAAA:m3CNPuldH2R05iCgkBhv9ADtlhDOi90cFJC71u3dXXsJ6G5IJ9nclEEeJ-WjlaFJf6Kw1Cirw). Acesso em: 9 mai. 2022.

DE MENEZES, S. T. C. *Análise do comportamento térmico de um edifício de construção vernacular*. Mestrado integrado em Engenharia Civil. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2024.

DE SÁ, M. V. A. et al. Uso de Nanopartículas Metálicas, Polímeros e Compostos Bioativos no Combate à Resistência de *Staphylococcus aureus*. *Brazilian Journal of Health Review*, [S. I.], v. 8, n. 1, p. e76393–e76393, 2025.

DIAS, L. I. R.; RAMOS, E. C.; FLORENCIO, O. Aproveitamento de resíduos da construção e demolição (RCD) na fabricação de blocos de concreto sem e com adição de óxido de grafeno. *Brazilian Journal of Development*, [S. I.], v. 7, n. 1, p. 5972–5989, 2021. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/23254>. Acesso em: 10 jul. 2021.

DIMIEV, A. M.; EIGLER, S. (Ed.). *Graphene oxide: fundamentals and applications*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=P1AeDQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP11&dq=Graphene+oxide:+fundamentals+and+applications&ots=orM8WqYzQ7&sig=lj5p1iL74i2RCC0pSDocc6jGCzU#v=onepage&q=Graphene%20oxide%3A%20fundamentals%20and%20applications&f=false>. Acesso em: 10 dez. 2021.

DUMAN, H. et al. Silver nanoparticles: A comprehensive review of synthesis methods and chemical and physical properties. *Nanomaterials*, [S. I.], v. 14, n. 18, p. 1527, 2024.

DURAIRAJ, S. et al. Bactericidal effect and cytotoxicity of graphene oxide/silver nanocomposites. *ACS Applied Materials & Interfaces*, [S. I.], v. 16, n. 15, p. 18300–18310, 2024.

ENERGYPLUS. Disponível em: <https://energyplus.net/>. Acesso em: jun. 2022.

EYSSA, H. M. et al. Physicochemical properties and flame retardancy of irradiated EPDM nanocomposites and possible application as insulating materials. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, [S. I.], p. 07316844241304158, 2024.

FAIA, C. C. M. *Determinação de componentes de tintas através de FTIR*. 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Porto, Portugal.

FAZENDA, J. M. R. *Tintas: ciência e tecnologia*. São Paulo: Editora Blucher, 2009. ISBN 9788521217657. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521217657/>. Acesso em: 31 jul. 2022.

FERREIRA, H. O. S.; CABRAL, M. I. R. Inovação na arquitetura: o potencial do vidro termocrômico e suas especificidades nas fachadas envidraçadas. *ARCHITECTON – Revista de Arquitetura e Urbanismo*, [S. I.], v. 8, n. 13, 2024.

FROTA, A. B. *Manual de conforto térmico*. São Paulo: Studio Nobel, 2006.

FU, S. et al. Some basic aspects of polymer nanocomposites: A critical review. *Nano Materials Science*, [S. I.], v. 1, n. 1, p. 2–30, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589965119300066>. Acesso em: 10 out. 2022.

GANGULI, P.; CHAUDHURI, S. Nanomaterials in antimicrobial paints and coatings to prevent biodegradation of man-made surfaces: A review. *Materials Today: Proceedings*, [S. I.], v. 45, p. 3769–3777, 2021. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321003643?casa\\_token=3FBVYairuogAAAAA:L\\_Rta7ghceOh-TRwXD7KsPRwbNZKUXV79HjNynJysR2kFURt6PyVHvs1UcPgjsGSiiW3il3M5Q](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321003643?casa_token=3FBVYairuogAAAAA:L_Rta7ghceOh-TRwXD7KsPRwbNZKUXV79HjNynJysR2kFURt6PyVHvs1UcPgjsGSiiW3il3M5Q). Acesso em: 10 abr. 2022.

GAO, Y. et al. Multifunctional cotton non-woven fabrics coated with silver nanoparticles and polymers for antibacterial, superhydrophobic and high performance microwave shielding. *Journal of Colloid and Interface Science*, [S. I.], v. 582, p. 112–123, 2021. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021979720310808?casa\\_token=etTQVO4toR4AAAAA:cm9BPg4eCLPj5st6K57PH6BL-5WhH4IkNOghvoepatuQ7KKVahZlc1YydbAk8gPySr1PTG4qyA](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021979720310808?casa_token=etTQVO4toR4AAAAA:cm9BPg4eCLPj5st6K57PH6BL-5WhH4IkNOghvoepatuQ7KKVahZlc1YydbAk8gPySr1PTG4qyA). Acesso em: 12 ago. 2022.

GARCÍA, I. et al. Residual CTAB ligands as mass spectrometry labels to monitor cellular uptake of Au nanorods. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, [S. I.], v. 6, n. 11, p. 2003–2008, 2015.

GARIPOV, I. T. et al. Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobial prophylaxis. *Journal of Siberian Federal University. Biology*, [S. I.], v. 12, n. 3, p. 266–276, 2019. Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/b4020aea3e4cd27950194a115d7d8522/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2035025>. Acesso em: 20 dez. 2021.

GHAMARI, M. et al. Advancing sustainable building through passive cooling with phase change materials, a comprehensive literature review. *Energy and Buildings*, [S. I.], v. 312, p. 114164, 2024.

GUO, Y. et al. Reduced graphene oxide heterostructured silver nanoparticles significantly enhanced thermal conductivities in hot-pressed electrospun polyimide nanocomposites. *ACS Applied Materials & Interfaces*, [S. I.], v. 11, n. 28, p. 25465–25473, 2019.

HESSEL, R. et al. Determinação do módulo de Young em sólidos a partir da medida da velocidade do som pelo método do tempo de voo. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, [S. I.], v. 38, p. e2309, 2016. Acesso em: 27 jan. 2025.

HINRICHES, R. A.; KLEINBACH, M. *Energia e meio ambiente*. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2014. ISBN 9788522116881. Disponível em: Minhabiblioteca. Acesso em: 31 jul. 2022.

HONG-LI, L et al. Novel GO/silica composite aerogels with enhanced mechanical and thermal insulation properties prepared at ambient pressure. *Ferroelectrics*, [S. I.], v. 528, n. 1, p. 15–21, 2018. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00150193.2018.1448192>. Acesso em: 2 dez. 2021.

HU, D. et al. Characterization of self-assembled silver nanoparticle ink based on nanoemulsion method. *Royal Society Open Science*, [S. I.], v. 7, n. 5, p. 200296, 2020. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rsos.200296>. Acesso em: 7 jan. 2022.

HUSSAIN, Z.; SALEEM, A; GAO, L. From waste to Innovation: Silver-Doped silicate ink coating from waste coal fly ash for hydrophobic antimicrobial fabric and Water-Oil separation. *Waste Management*, [S. I.], v. 194, p. 238–248, 2025.

INDOVINYA. Agentes coalescentes – o processo de formação de filme. *Indorama Ventures*, 2020. Disponível em: <https://indovinya.indoramaventures.com/pt-br/coalescentes-processo-formacao-filme>. Acesso em: 17 ago. 2025.

INNOCENCIO, C. R.; SALZANI, L. O.; PEREIRA, T. S. S.; BARBOSA, M. T. G. A termografia e o uso de veículo aéreo não tripulado como instrumentos de auxílio no diagnóstico de manifestações patológicas em patrimônio cultural edificado. *Gestão & Tecnologia de Projetos*, São Carlos, v. 16, n. 3, 2021. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/gestaodeprojetos/article/view/174232>. Acesso em: 04 fev. 2025.

JANJAROEN, T. et al. The Mechanical and Thermal Properties of Cement CAST Mortar/Graphene Oxide Composites Materials. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, [S. I.], v. 16, p. 34, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s40069-022-00521-z>.

JAWORSKI, S. et al. Graphene oxide-based nanocomposites decorated with silver nanoparticles as an antibacterial agent. *Nanoscale Research Letters*, [S. I.], v. 13, n. 1, p. 1–17, 2018. Disponível em: <https://nanoscalereslett.springeropen.com/articles/10.1186/s11671-018-2533-2>. Acesso em: 7 jan. 2022.

JESUS, C. E. M. et al. *Reologia em tintas aquosas*. Estudo realizado no âmbito do PRODEC. 2000.

JOUNI, M. et al. Electrical and thermal properties of polyethylene/silver nanoparticle composites. *Polymer Composites*, [S. I.], v. 34, n. 5, p. 778–786, 2013.

KAUSAR, A. Conjugated Polymer/Graphene Oxide Nanocomposites—State-of-the-Art. *Journal of Composites Science*, [S. I.], v. 5, n. 11, p. 292, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2504-477X/5/11/292>. Acesso em: 10 jan. 2022.

KHABIBULLIN, V. R. et al. The Thermophysical and Physicochemical Properties of the Aqueous Dispersion of Graphene Oxide Dual-Beam Thermal Lens Spectrometry. *Nanomaterials*, [S. I.], v. 13, n. 14, p. 2126, 2023.

KHAYDAROV, R. R. et al. Using silver nanoparticles as an antimicrobial agent. In: *Biodefence*. Dordrecht: Springer, 2011. p. 169–177. Disponível em: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-0217-2\\_18](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-0217-2_18). Acesso em: 10 dez. 2021.

KHEDKAR, M. V.; SOMVANSHI, S. B.; JADHAV, K. M. Enhancing thermal stability and electrical conductivity performance of silica aerogel via graphene oxide integration. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, [S. I.], p. 1–15, 2024.

KHITAB, A. et al. Thermal insulation of buildings through classical materials and nanomaterials. In: *Recent Advances in Nano-Tailored Multi-Functional Cementitious Composites*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2022. p. 277–303. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323852296000111>. Acesso em: 30 set. 2022.

KREITH, F.; MANGLIK, R. M.; BOHN, M. S. *Princípios de transferência de calor.* Tradução da 7<sup>a</sup> edição norte-americana. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2015. ISBN 9788522122028. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788522122028/>. Acesso em: 29 jul. 2022.

KUMAR, L. P.; THOMAS, N. B.; GEORGE, N. A. Enhanced antimicrobial properties of mural colours by the addition of titanium dioxide nanoparticles. *The European Physical Journal Plus*, [S. I.], v. 139, n. 6, p. 469, 2024.

KURANTOWICZ, N. et al. Interaction of graphene family materials with *Listeria monocytogenes* and *Salmonella enterica*. *Nanoscale Research Letters*, [S. I.], v. 10, n. 1, p. 1–12, 2015. Disponível em: <https://nanoscalereslett.springeropen.com/articles/10.1186/s11671-015-0749-y>. Acesso em: 8 dez. 2021.

KYLILI, A. et al. Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review. *Applied Energy*, [S. I.], v. 134, p. 531–549, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914008083>. Acesso em: 10 fev. 2022.

LAI, D. J. Y. et al. Harnessing acrylic-PVDF binders in paint formulation for enhanced passive cooling performance. *Applied Energy*, [S. I.], v. 377, p. 124510, 2025.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. *Eficiência energética na arquitetura*. 3. ed. São Paulo: PW, 2014.

LANGE, A. et al. Nanocomposites of graphene oxide—silver nanoparticles for enhanced antibacterial activity: mechanism of action and medical textiles coating. *Materials*, [S. I.], v. 15, p. 3122, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma15093122>. Acesso em: 10 set. 2022.

LARA, H. H. et al. Silver nanoparticles are broad-spectrum bactericidal and virucidal compounds. *Journal of Nanobiotechnology*, [S. I.], v. 9, n. 1, p. 1–8, 2011. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1186/1477-3155-9-30>. Acesso em: 12 nov. 2021.

LEI, Y. et al. Enhancements of thermal insulation and mechanical property of silica aerogel monoliths by mixing graphene oxide. *Materials Chemistry and Physics*, [S. I.], v. 187, p. 183–190, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0254058416308975>. Acesso em: 2 jan. 2022.

LIU, C. et al. Point-surface structured modified graphene oxide-based rubber composites with simultaneous enhanced mechanical properties, low heat build-up and thermal conductivity. *Polymer Composites*, [S. I.], 2025.

LU, Y. et al. Development of water-based thermal insulation paints using silica aerogel made from incineration bottom ash. *Energy and Buildings*, [S. I.], v. 259, p. 111866, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778822000378>. Acesso em: 30 set. 2022.

MADRIGAL, J. A.; CABELLO, J. J.; SAGASTUME, A.; BALBIS, M. Evaluación de la climatización en locales comerciales, integrando técnicas de termografía, simulación y modelado por elementos finitos. *Información Tecnológica*, [S. I.], v. 29, n. 4, p. 179–188, 2018. Disponível em: [https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642018000400179&script=sci\\_arttext&tlang=pt](https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642018000400179&script=sci_arttext&tlang=pt). Acesso em: 04 fev. 2025.

MALZ, S.; KRENKEL, W.; STEFFENS, O. Infrared reflective wall paint in buildings: energy saving potentials and thermal comfort. *Energy and Buildings*, [S. I.], v. 224, p. 110212, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778820309038>. Acesso em: 14 jul. 2021.

MANZAR, R. et al. Graphene oxide-mediated green synthesis of Ag, Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and ZnO nanocomposites for multifunctional antimicrobial applications. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, [S. I.], v. 113, n. 2, p. 573–591, 2025.

MARK, H. F. *Encyclopedia of polymer science and technology: concise*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.

MATOS, C. F. *Materiais nanocompósitos multifuncionais formados por látices poliméricos e grafeno ou óxido de grafeno: síntese, caracterização e propriedades*. 2015. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Disponível em: <https://www.acervodigital.ufpr.br/handle/1884/41326>. Acesso em: 20 out. 2019.

MATOS, C. F.; GALEMBECK, F.; ZARBIN, A. J. G. Nanocompósitos multifuncionais de látex de borracha natural e nanoestruturas de carbono. *Revista Virtual de Química*, [S. I.], v. 9, n. 1, p. 73–96, 2017.

MATOS, C. F. et al. Graphene oxide as a surfactant in the nanostructuring of a conduction polymer: effect on the electronic structure, chain orientation, and charge transfer dynamics. *Organic Electronics*, [S. I.], v. 75, p. 105440, 2019.

MAXIMINO, F. L. *Caracterização de Plasmons de Superfície em filmes de metais nobres através de tunelamento ótico*. 2011. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

MBAMBO, M. C. et al. Thermal conductivity enhancement in gold decorated graphene nanosheets in ethylene glycol based nanofluid. *Scientific Reports*, [S. I.], v. 10, n. 1, p. 14730, 2020.

MCGILLICUDDY, E. et al. Silver nanoparticles in the environment: sources, detection and ecotoxicology. *Science of the Total Environment*, [S. I.], v. 575, p. 231–246, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969716322070>. Acesso em: 8 dez. 2021.

MEHL, H. et al. Efeito da variação de parâmetros reacionais na preparação de grafeno via oxidação e redução do grafite. *Química Nova*, [S. I.], v. 37, p. 1639–1645, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/cR7bCKQZtwkQ3QkgqDxvBgN/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 15 jul. 2021.

MEHL, H. *Nanocompósitos constituídos por grafeno e nanopartículas metálicas: síntese, caracterização e aplicação*. 2015. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

MINUSCULLI, P. et al. Estudo da condutividade térmica dos envolventes de ambientes construídos. *Tecno-Lógica*, Santa Cruz do Sul, v. 26, n. 1, p. 35–43, 2022. Disponível em: <https://online.unisc.br/seer/index.php/tecnologica/article/view/17034>. Acesso em: 30 set. 2022.

MISIRLI, G. M.; PATRICIO, B. F. C.; ABRANTES, S. M. P. Nanopartículas de prata para uso bactericida: fatores extrínsecos e intrínsecos para aumento da estabilidade. *Revista Virtual de Química*, [S. I.], v. 14, n. 5, 2022.

MONTEIRO, S. C. A. et al. A história do conforto ambiental e eficiência energética em edificações: fatores, regulamentações, tecnologia e algoritmos. *Revista Campo da História*, [S. I.], v. 9, n. 2, p. e229–e229, 2024.

MORAES, J.; PRADO, E. Hidrocerâmica: conforto térmico sem ar condicionado. *ETIC – Encontro de Iniciação Científica*, [S. I.], v. 16, n. 16, 2020. Disponível em: <http://intertemas.toledoprudente.edu.br/index.php/ETIC/article/view/8586>. Acesso em: 20 out. 2021.

MORAN, M. J. et al. *Introdução à engenharia de sistemas térmicos*. São Paulo: Grupo GEN, 2005. ISBN 978-85-216-1977-2. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-1977-2/>. Acesso em: 30 jul. 2022.

MULFINGER, L. et al. Synthesis and study of silver nanoparticles. *Journal of Chemical Education*, [S. I.], v. 84, n. 2, p. 322, 2007. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ed084p322>. Acesso em: 10 out. 2021.

NAIDEK, N. *Desenvolvimento de nanocompósitos entre derivados de grafeno/nanotubos de carbono e polímeros condutores: funcionalização direcionada*. 2019. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

NAIKWADI, A. T.; SAMUI, A. B.; MAHANWAR, Prakash. Experimental investigation of nano/microencapsulated phase change material emulsion based building wall paint for solar thermal energy storage. *Journal of Polymer Research*, [S. I.], v. 28, n. 11, p. 1–16, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10965-021-02808-3>. Acesso em: 10 jan. 2022.

NASER, H. N. et al. Green synthesis of novel chitosan-graphene oxide-silver nanoparticle nanocomposite for broad-spectrum antibacterial applications. *Oxford Open Materials Science*, [S. I.], v. 5, n. 1, p. itae018, 2025.

NAZARI, M. A. et al. A review of nanomaterial incorporated phase change materials for solar thermal energy storage. *Solar Energy*, [S. I.], v. 228, p. 725–743, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X2100712X>. Acesso em: 5 fev. 2022.

NETO, A. C.; GEIM, A. Graphene: graphene's properties. *New Scientist*, [S. I.], v. 214, n. 2863, p. iv–v, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0262407912611166>. Acesso em: 5 out. 2022.

NGUYEN, T. H. et al. Synthesis of silica aerogel particles and its application to thermal insulation paint. *Korean Journal of Chemical Engineering*, [S. I.], v. 37, n. 10, p. 1803–1809, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11814-020-0574-6>. Acesso em: 09 jul. 2021.

NOVELIZA, S. et al. MgO's effect on wall paint's antibacterial properties. In: *AIP Conference Proceedings*. Melville: AIP Publishing LLC, 2024. p. 030005.

NOVO, M. M. M. et al. Fundamentos básicos de emissividade e sua correlação com os materiais refratários, conservação de energia e sustentabilidade. *Cerâmica*, [S. I.], v. 60, p. 22–33, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/3cx4pRmLNKNTs7VGFzFKqML/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 30 ago. 2022.

NOVOSELOV, K. S. et al. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, [S. I.], v. 306, n. 5696, p. 666–669, 2004. Disponível em: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1102896>. Acesso em: 4 mai. 2021.

PAL, S.; TAK, Y. K.; SONG, J. M. Does the antibacterial activity of silver nanoparticles depend on the shape of the nanoparticle? A study of the gram-negative bacterium *Escherichia coli*. *Applied and Environmental Microbiology*, [S. I.], v. 73, n. 6, p. 1712–1720, 2007.

PAPADOPoulos, A.M. State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. *Energy and Buildings*, [S. I.], v. 37, n. 1, p. 77–86, 2005.

PHILIPPI JR, A.; REIS, L. *Energia e sustentabilidade*. Barueri, SP: Manole, 2016.

PILZ, C. F. *Influência das propriedades da resina nas propriedades de uma tinta base água*. 2004.

PINTO, V. V. et al. Long time effect on the stability of silver nanoparticles in aqueous medium: effect of the synthesis and storage conditions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, [S. I.], v. 364, n. 1–3, p. 19–25, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092777571000244X>. Acesso em: 30 out. 2021.

POYYAMOZHI, M. et al. Elevating thermal comfort with eco-friendly concrete roof tiles crafted from municipal solid waste. *Journal of Building Engineering*, [S. I.], v. 88, p. 109222, 2024.

PRADEEP, N. et al. Silver nanoparticles for enhanced thermal energy storage of phase change materials. *Materials Today: Proceedings*, [S. I.], v. 45, p. 607–611, 2021.

PRASAD, K. et al. Synergic bactericidal effects of reduced graphene oxide and silver nanoparticles against Gram-positive and Gram-negative bacteria. *Scientific Reports*, [S. I.], v. 7, n. 1, p. 1–11, 2017. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-017-01669-5>. Acesso em: 10 jan. 2022.

PULINGAM, T. et al. Mechanistic actions and contributing factors affecting the antibacterial property and cytotoxicity of graphene oxide. *Chemosphere*, [S. I.], v. 281, p. 130739, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653521012108>. Acesso em: 2 jul. 2022.

RAMOS, I. M. F. C. *Nanopartículas poliméricas funcionalizadas para liberação de fármaco no sistema nervoso central*. 2018.

RAMOS, E. C. et al. *Utilização de resíduos de construção e demolição na fabricação de blocos de concreto estrutural com adição de óxido de grafeno*. 2020. Tese (Doutorado – restrita) – Universidade Presbiteriana Mackenzie.

RANE, A. V. et al. Methods for synthesis of nanoparticles and fabrication of nanocomposites. In: *Synthesis of Inorganic Nanomaterials*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2018. p. 121–139.

RAZAQ, A. et al. Review on graphene-, graphene oxide-, reduced graphene oxide-based flexible composites: from fabrication to applications. *Materials*, [S. I.], v. 15, n. 3, p. 1012, 2022.

RIPPEL, M. M. *Caracterização microestrutural de filmes e partículas de látex de borracha natural*. 2005. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Química, Campinas.

ROBAK, M.; KOŽLECKI, T. Simple and rapid technique for measure of liquid paints antimicrobial activity. *SSRG International Journal of Agriculture & Environmental Science*, v. 6, n. 5, set.-out. 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/338163222>. Acesso em: 2 fev. 2022.

ROCHA, J. H. A. et al. Detecção de infiltração em áreas internas de edificações com termografia infravermelha: estudo de caso. *Ambiente Construído*, [S. I.], v. 18, n. 4, p. 329–340, 2018.

RODRÍGUEZ, M. V.; MELGAR, S. G.; MÁRQUEZ, J. M. A. Evaluation of aerial thermography for measuring the thermal transmittance (U-value) of a building façade. *Energy and Buildings*, [S. I.], v. 324, p. 114874, 2024.

ROHMAN, N.; MOHIUDDIN, T.; SELVARAJ, R. *Effect of defect on thermal conductivity of graphene*. SSRN, [S. I.], 2024. Disponível em: SSRN: 4711322.

ROY, A. et al. Emplacement of screen-printed graphene oxide coating for building thermal comfort discernment. *Scientific Reports*, [S. I.], v. 10, n. 1, p. 1–13, 2020. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-72670-8>. Acesso em: 11 jul. 2021.

RUIVO, C. C. G. P. Desenvolvimento de argamassa para reparo de estruturas na construção civil utilizando óxido de grafeno como aditivo. *Brazilian Journal of Development*, [S. I.], v. 7, n. 1, p. 8082–8100, 2021. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/23550>. Acesso em: 14 jul. 2021.

SÁ, E. M. F. et al. *Síntese de nanopartículas de prata para obtenção de nanocompósito e avaliação da atividade bactericida em poliestireno expansível*. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/171440>. Acesso em: 11 jul. 2021.

SALLEH, A. et al. The potential of silver nanoparticles for antiviral and antibacterial applications: a mechanism of action. *Nanomaterials* (Basel), [S. I.], v. 10, n. 8, p. 1566, 2020. doi: 10.3390/nano10081566.

SANMUGAM, A. et al. Chitosan-integrated curcumin-graphene oxide/copper oxide hybrid nanocomposites for antibacterial and cytotoxicity applications. *Antibiotics*, [S. I.], v. 13, n. 7, p. 620, 2024.

SANTOS, G. R. F. et al. *Produção de nanofibras de sílica por solution blow spinning e avaliação da sua incorporação em resinas acrílicas*. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/12921>. Acesso em: 12 jul. 2021.

SARAVIA, S. G. G. et al. Anti-adhesion and antibacterial activity of silver nanoparticles and graphene oxide-silver nanoparticle composites. *Matéria* (Rio de Janeiro), [S. I.], v. 25, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/HwVNTzzpm9QswHtzvqLqPFS/?lang=en&format=html>. Acesso em: 10 dez. 2021.

SEIXAS, J. N. *Análise do desempenho térmico de uma espuma vítreia aplicada em habitação de interesse social*. 2020. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas. Disponível em: <http://www.guaiaca.ufpel.edu.br/handle/prefix/7506>. Acesso em: 10 jul. 2021.

SHACKELFORD, J. F. Ciência dos materiais. 6. ed. São Paulo: Pearson, 2008.

SCHERRER, P. Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse. Vol. 2, 98-100, 1918.

SILVA E SOUZA, C. A. *Filmes compostos de fosfato de alumínio e látex: morfologia e propriedades ópticas*. 2009. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Química, Campinas. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000477369>. Acesso em: 9 set. 2022.

SILVA, G. P.; BATISTA, P. I. B.; PÓVOAS, Y. V. O uso da termografia infravermelha para o estudo do desempenho térmico de paredes: revisão bibliográfica. *Revista ALCONPAT*, [S. I.], v. 9, n. 2, p. 117–129, 2019. Disponível em: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-68352019000200117&script=sci\\_abstract&tlang=pt](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-68352019000200117&script=sci_abstract&tlang=pt). Acesso em: 7 jul. 2022.

SILVA, J. F. G. et al. Effect of silver-coated silica nanoparticles on the thermal conductivity of thermally activated acrylic resin. *Brazilian Dental Science*, [S. I.], v. 25, n. 3, 2022.

SILVA, O. L. *Estudo do polipropileno de alta resistência do fundido (HMSPP) irradiado com carbonato de cálcio/nanopartículas de prata para fins de atividade bactericida*. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em:

<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-01032021-111908/en.php>. Acesso em: 09 jul. 2021

SILVA, M. S.; BAUER, Elton. Investigação termográfica para caracterização de fissuras em fluxo de aquecimento e resfriamento: estudos de laboratório. *Ambiente Construído*, [S. I.], v. 24, p. e131881, 2024. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/v8YQXjGmjQV7dTJsFmzjyvw/>. Acesso em: 04 fev. 2025.

SOLDANO, C.; MAHMOOD, A.; DUJARDIN. Production, properties and potential of graphene. *Carbon*, [S. I.], v. 48, n. 8, p. 2127–2150, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008622310000928>. Acesso em: 20 out. 2021.

SOLERA-SENDRA, J. et al. Recent advances in combining waterborne acrylic dispersions with biopolymers. *Polymers*, [S. I.], v. 17, n. 8, p. 1027, 2025.

SPINELLI, R. et al. *Isolamento térmico: aplicação e avaliação de materiais naturais e inovadores para edificações*. 2019. Tese (Doutorado em Ambiente e Desenvolvimento) – Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES. Acesso em: 8 fev. 2022.

SUWAL, S. R.; RAMASWAMY, A. P. Performance of roof-cool paints prepared using organic acrylic polymer binder and inorganic additives for the thermal reduction in buildings. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, [S. I.], v. 41, n. 2, p. e13767, 2022. Acesso em: 1 out. 2022.

TALARSKA, P.; BORUCZKOWSKI, M.; ŻURAWSKI, J. Current knowledge of silver and gold nanoparticles in laboratory research—application, toxicity, cellular uptake. *Nanomaterials*, [S. I.], v. 11, p. 2454, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/nano11092454>. Acesso em: 28 mar. 2022.

TOHAMY, H. S.; EL-MASRY, H. M. Fluffy-like amphiphilic graphene oxide and its effects on improving the antibacterial activity and thermal outstanding of ethyl cellulose/polyvinyl alcohol hydrogel film. *BMC Chemistry*, [S. I.], v. 18, n. 1, p. 116, 2024.

TRAN, N. T. et al. Nanocompósitos de quitosana/óxido de grafeno/Ag carregados em filmes de álcool polivinílico como filme biodegradável, bloqueador de UV e antibacteriano para embalagens de frutas. *Journal of Applied Polymer Science*, [S. I.], p. e56677, 2025.

TRIPATHY, S. et al. Mechanical and thermal properties of polyamide-6 nanocomposites reinforced by graphene oxide with low loading by double extrusion method. *Polymers for Advanced Technologies*, [S. I.], v. 34, n. 8, p. 2788–2798, 2023.

VALADARES, L. F. et al. *Nanocompósitos de borracha natural e argila: preparação a partir de látex*. 2005. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas. Disponível em: [http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/250293/1/Valadares\\_LeonardoFonseca\\_M.pdf](http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/250293/1/Valadares_LeonardoFonseca_M.pdf). Acesso em: 5 nov. 2021.

VERBEKE, S.; AUDENAERT, A. Thermal inertia in buildings: a review of impacts across climate and building use. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [S. I.], v. 82, p. 2300–2318, 2018.

XU, D. et al. Enhancing the mechanical properties of waterborne polyurethane paint by graphene oxide for wood products. *Polymers*, [S. I.], v. 14, n. 24, p. 5456, 2022.

XUE, T. et al. Layered double hydroxide/graphene oxide synergistically enhanced polyimide aerogels for thermal insulation and fire-retardancy. *Composites Part B: Engineering*, [S. I.], v. 219, p. 108963, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836821003516>. Acesso em: 12 jul. 2022.

YABUKI, M. Y.; OTONI, C. G.; CELANI, M. G. C. Alta tecnologia e reuso de materiais descartados: desenvolvimento de um painel decorativo para a melhoria do desempenho térmico em edificações. *Gestão e Tecnologia de Projetos*, São Carlos, v. 15, n. 2, p. 6–19, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v15i2.155158>. Acesso em: 07 set. 2022.

YARI, H. et al. Enhanced outdoor durability of polyurethane nanocomposite coatings with green reduced graphene oxide nanoplatelets. *Progress in Organic Coatings*, [S. I.], v. 154, p. 106212, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300944021000837>. Acesso em: 10 jul. 2022.

YU, S. et al. Impact of civil envelope on energy consumption based on EnergyPlus. *Procedia Engineering*, [S. I.], v. 121, p. 1528–1534, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815029586>. Acesso em: 4 nov. 2021.

YU, S.; YIN, Y.; LIU, J. Silver nanoparticles in the environment. *Environmental Science: Processes & Impacts*, [S. I.], v. 15, n. 1, p. 78–92, 2013. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2013/em/c2em30595j>. Acesso em: 8 jul. 2022.

YU, W. et al. Graphene oxide-silver nanocomposites embedded nanofiber core-spun yarns for durable antibacterial textiles. *Journal of Colloid and Interface Science*, [S. I.], v. 584, p. 164–173, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021979720312819>. Acesso em: 12 jul. 2022.

ZARBIN, A. J. G.; OLIVEIRA, M. M. Nanoestruturas de carbono (nanotubos, grafeno): Quo Vadis?. *Química Nova*, [S. I.], v. 36, p. 1533–1539, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/3JPDgp4ZqLGYYgf68grgZ5w/?lang=pt>. Acesso em: 7 set. 2022.

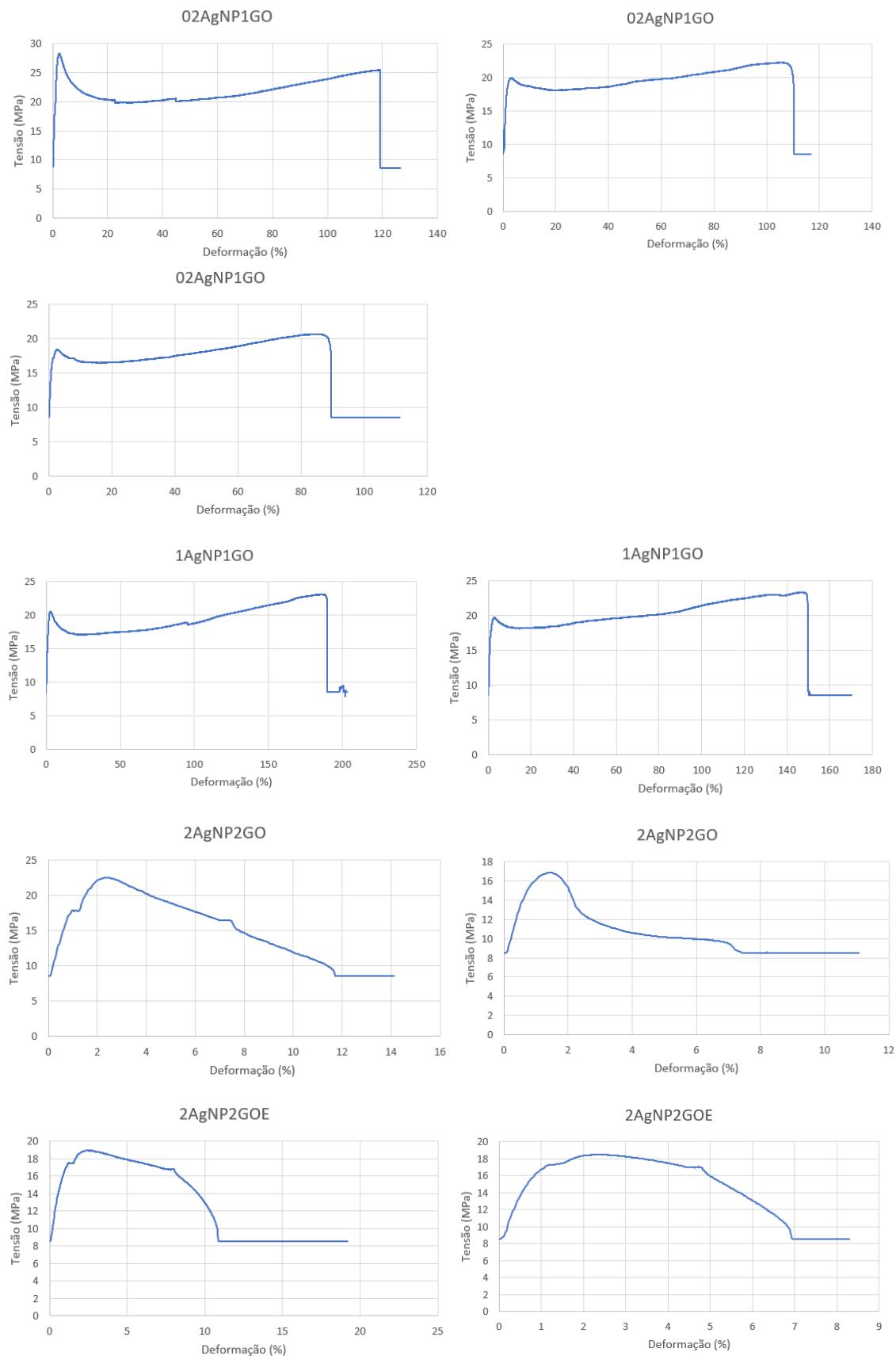
ZARBIN, A.J. G.; ORTH, E. S. Algumas estruturas do carbono elementar e sua importância para o desenvolvimento e soberania do Brasil. *Química Nova*, [S. I.], v. 42, p. 1225–1231, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/ZPtRWprTVZ7bmQvYjZPFZsg/?lang=pt>. Acesso em: 7 set. 2022.

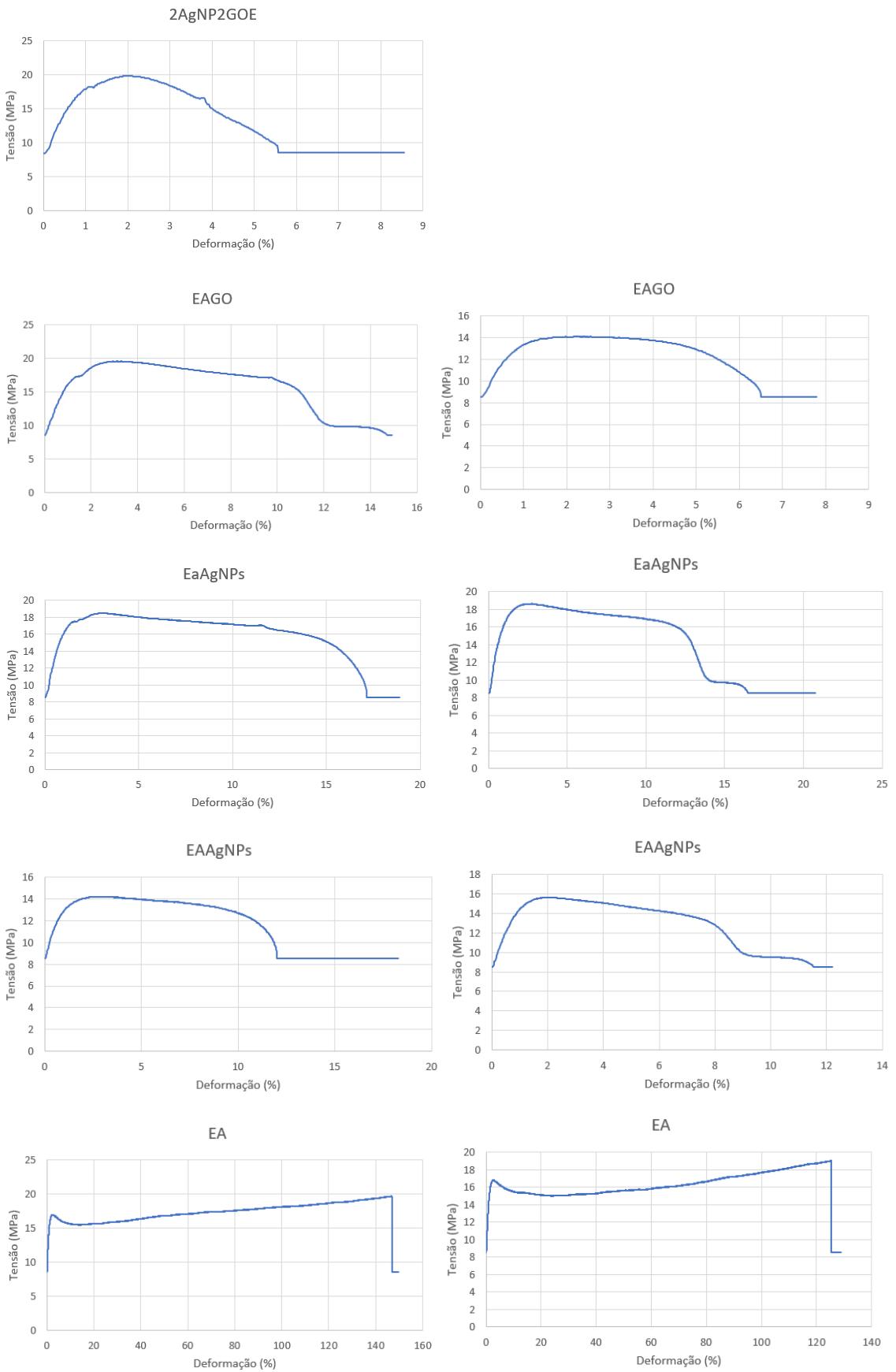
ZHANG, D.; LI, Z. Impact of solar radiation on the operation performance of radiant cooling systems: a comprehensive literature review. *Journal of Building Engineering*, [S. I.], p. 112343, 2025.

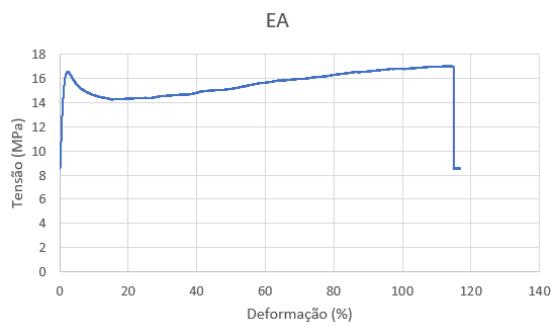
ZHU, Y. et al. Graphene and graphene oxide: synthesis, properties, and applications. *Advanced Materials*, [S. I.], v. 22, n. 35, p. 3906–3924, 2010. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.201001068>. Acesso em: 8 jul. 2021.

## **Apêndices**

## Apêndice 1 – Gráficos Tensão/Deformação das amostras







## Apêndice 2 – Produção científica



### NANOCOMPÓSITOS POLIMÉRICOS COM ÓXIDO DE GRAFENO E NANOPARTÍCULAS DE PRATA COMO REVESTIMENTO TÉRMICO E BACTERICIDA PARA CONSTRUÇÃO CIVIL

**BARASUOL, Fernanda<sup>1</sup>; SOUZA, Nicholas<sup>1</sup>, MACHADO, Fernando<sup>1</sup>, JAURIS, Carolina Ferreira de Matos<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Centro de Desenvolvimento Tecnológico (CDTec) , Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), Pelotas, RS, Brasil

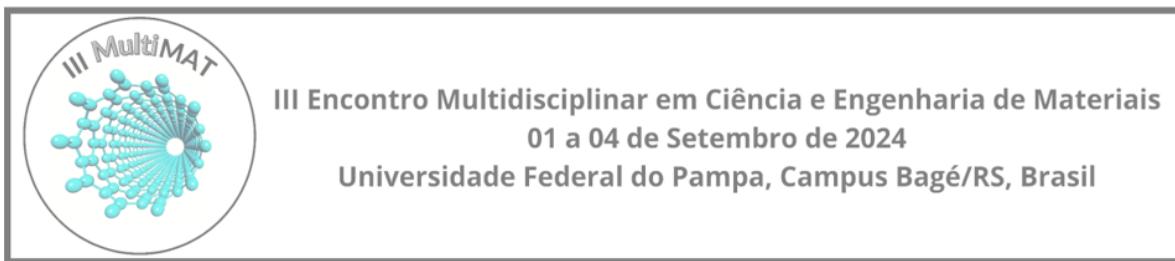
<sup>2</sup>Departamento de Química, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, Brasil  
E-mail: nanda.barasuol@gmail.com

#### RESUMO

É notória a necessidade da melhoria do desempenho térmico das edificações, assim como a importância de um ambiente limpo e saudável. A constante busca por alternativas construtivas utilizando materiais inovadores com reforços nanométricos é pauta de recentes estudos [1]. Os nanomateriais contam com propriedades interessantes que podem aprimorar ou desenvolver novas propriedades quando utilizados na composição de materiais nanocompósitos. O óxido de grafeno (GO) e as nanopartículas de prata (AgNPs) são exemplos de nanomateriais que apresentam atividades antimicrobianas, além de resistência mecânica, e que possuem grande potencial para serem utilizados como carga em materiais nanocompósitos. Derivado do grafeno, o GO pode ser obtido pela oxidação química do grafite seguido de esfoliação e apresenta propriedades térmicas interessantes [2]. Já as nanopartículas de prata, por sua vez, são comprovados redutores de bactérias, vírus e outros patógenos. Neste trabalho, desenvolvemos materiais nanocompósitos a base de AgNPs e GO incorporados em matrizes poliméricas (látex acrílico) para aplicação como revestimento (pintura) na construção civil. Primeiramente, foi realizada a síntese dos materiais precursores e a otimização experimental para a síntese dos nanocompósitos utilizando a tecnologia do látex, definindo proporções e testes de substrato. Foi realizada a caracterização dos nanomateriais por microscopia de força atômica (AFM, no modo de topografia e nanomecânica), por microscopia eletrônica de varredura e por espectroscopias no infravermelho e Raman. Os resultados obtidos demonstraram uma boa interação entre os componentes do nanocompósito. As micrografias obtidas por MEV indicaram a boa dispersão - homogeneidade das cargas na matriz polimérica, bem como uma boa adesão. Imagens obtidas via AFM mostraram que a inserção do GO aumenta a adesividade e o módulo de elasticidade do polímero. Nas próximas etapas iremos avaliar atividade antimicrobiana e através de experimentos e cálculos computacionais estimar as propriedades térmicas dos materiais. Serão também realizadas análises reológicas e demais caracterizações tecnológicas conforme as normas técnicas. Espera-se com este trabalho desenvolver nanocompósitos com características antimicrobianas e propriedades térmicas com possibilidade de utilização como alternativa para revestimento na construção civil.

#### REFERÊNCIAS

- [1] DIAS, L. I. R.; RAMOS, E. C.; FLORENCIO, O. Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 1, p. 5972-5989, 2021.
- [2] MATOS, CF. GALEMBECK, F and AJG, ZARBIN. Carbon 78, 469-479, 2014.



## NANOCOMPÓSITOS A BASE DE ÓXIDO DE GRAFENO E NANOPARTÍCULAS DE PRATA – UMA REVISÃO

FV BARASUOL<sup>1</sup>, NF DE SOUZA<sup>2</sup>, CFM JAURIS<sup>3</sup>, FM MACHADO<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Centro Universitário da Região da Campanha / Universidade Federal de Pelotas – Centro de Desenvolvimento Tecnológico -CDTEC

<sup>2</sup> Universidade Federal de Pelotas – Centro de Desenvolvimento Tecnológico -CDTEC

<sup>3</sup> Universidade Federal de Santa Maria – Departamento de Química

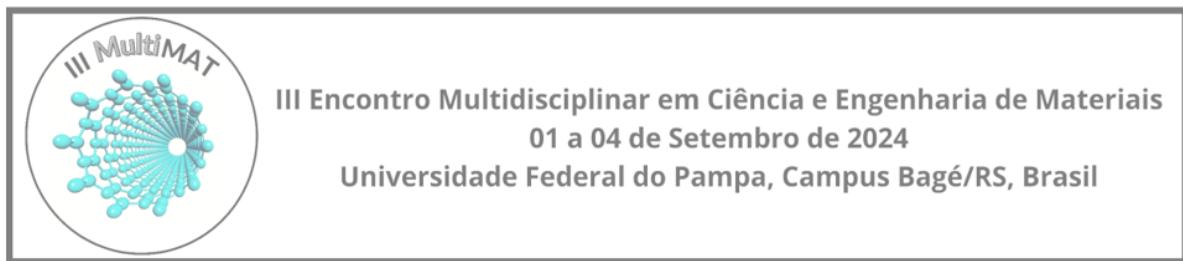
<sup>4</sup> Universidade Federal de Pelotas – Centro de Desenvolvimento Tecnológico -CDTEC

E-mail para contato: nanda.barasuol@gmail.com

**RESUMO** – Otimizar a eficiência das edificações e prover ambientes saudáveis é uma necessidade constante. Neste sentido, a busca de materiais inovadores para revestimentos tem mostrado destaque nas pesquisas e estudos recentes, especialmente em se tratando do uso de nanomateriais. Alguns exemplos de reforços nanométricos promissores são o óxido de grafeno (GO) e as nanopartículas de prata (AgNPs), nanomateriais que apresentam propriedades antibacterianas, mecânicas, estabilidade térmica, entre outras características. Esse trabalho visa apresentar uma revisão bibliográfica a respeito de materiais híbridos à base de AgNPs e GO, incorporados ou não em matrizes poliméricas. Pode-se observar que há um avanço nas pesquisas a respeito dos temas abordados, onde nota-se a sinergia entre os dois nanomateriais, otimizando as propriedades individuais e, quando utilizados como carga de reforço na matriz polimérica, melhoraram consideravelmente as propriedades do polímero puro.

### 1 INTRODUÇÃO

É primordial a busca de materiais que visem otimizar a eficiência das edificações na construção civil. Os nanomateriais apresentam algumas propriedades específicas, e quando aplicados como reforço em pequenas quantidades em matrizes, formando, assim materiais compósitos, podem aprimorar ou desenvolver novas propriedades. Alguns exemplos de nanomateriais amplamente utilizados na produção de compósitos são o óxido de grafeno (GO) e as nanopartículas de prata (AgNPs). O GO, estrutura 2D da família do grafite (Matos, 2015). Esse tem como algumas vantagens suas excelentes propriedades mecânicas e a sua hidrofilicidade, o que facilita sua



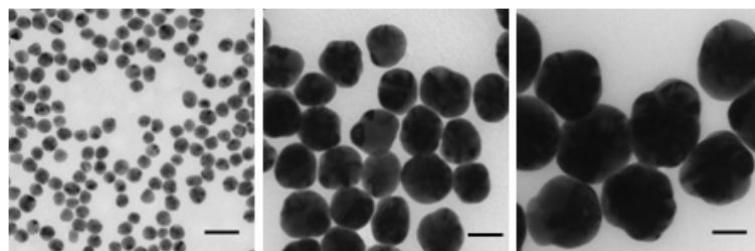
dispersão em solventes como a água (Zhu *et al.*, 2010). Pode-se observar na Figura 1 a estrutura do GO.

Figura 01 – Óxido de grafeno. Fonte: Adaptado de Kausar (2021)

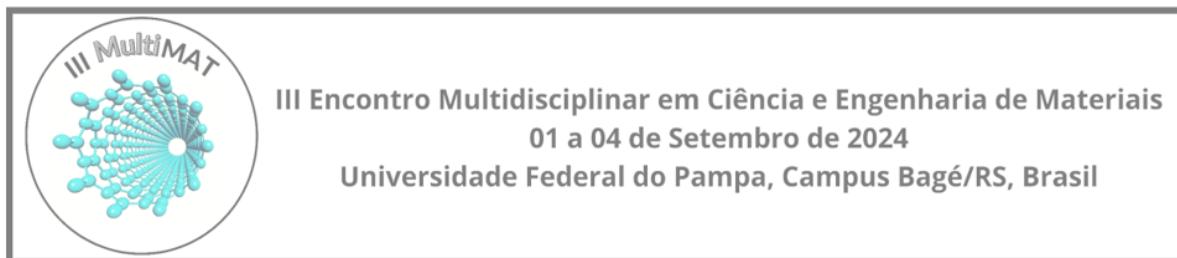


Já as AgNPs, apresentadas na Figura 2, estrutura 0D, podem ser sintetizadas a partir de diferentes rotas, sendo a mais comum a de redução dos íons de prata utilizando um agente redutor (Mehl, 2015). As AgNPs podem conferir propriedades antimicrobianas (Sa *et al.*, 2015), inclusive quando aplicadas a matrizes poliméricas.

Figura 02 – Nanopartículas de prata. Fonte: Adaptado de Martins (2016)



Muitas nanoestruturas possibilitam melhora de propriedades quando utilizadas como reforço em matrizes poliméricas (Bokobsa, 2017), potencializando suas aplicações em função da melhora nas limitações físicas e mecânicas do polímero puro (Fu *et al.*, 2019). Óxido de grafeno foi estudado por Matos e colaboradores (Matos *et al.*, 2019) como alternativa de surfactante em polímeros, mostrando ser uma alternativa para uma maior interação entre os componentes dos nanocompósitos.



O objetivo deste trabalho é fazer uma revisão bibliográfica a respeito de trabalhos científicos que abordam a produção de nanocompósitos utilizando AgNPs, GO e látex polimérico como materiais precursores.

## 2 METODOLOGIA

A metodologia utilizada nesta pesquisa é caracterizada, segundo Silveira e Córdova (Silveira & Córdova, 2009), quanto à abordagem, como qualitativa. Quanto aos procedimentos, a pesquisa caracteriza-se como bibliográfica, na qual foi realizada uma revisão a respeito do Estado-da-Arte no que se refere à nanocompósitos utilizando GO, AgNPs e látex polimérico como materiais precursores. A seleção dos artigos foi realizada, principalmente, por meio da plataforma de busca Web of Science – base de dados CAPES, com período definido entre 01/01/2010 e 29/07/2024.

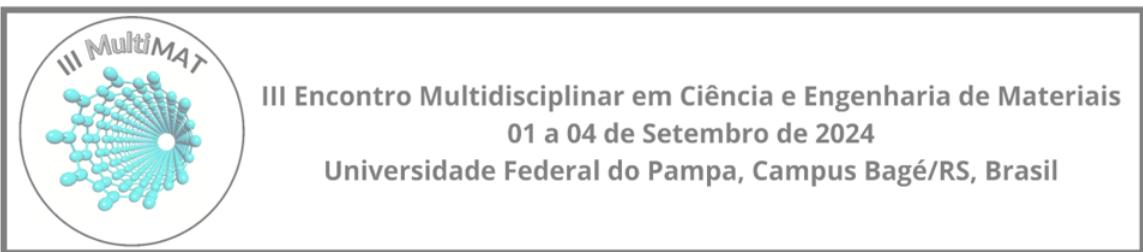
## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nanopartículas de prata e óxido de grafeno, isoladamente, têm despertado o interesse de muitos pesquisadores. No entanto, as características destes dois nanomateriais combinados podem apresentar resultados inovadores. Algumas características das nanopartículas de prata isoladas são as atividades antibacterianas, antifúngicas e antivirais significativas, as quais, comparadas à outras nanopartículas metálicas, apresentam melhor desempenho inclusive quanto às bactérias multirresistentes (Alavi & Ashengroph, 2023). Em relação à revestimentos, o estudo de Calovi e colaboradores (Calovi *et al.*, 2023), analisou o efeito de duas concentrações diferentes de prata coloidal na durabilidade, estética e atividade antimicrobiana de uma tinta para madeira, à base de água, demonstrando o potencial da prata ao melhorar o desempenho antibacteriano do revestimento, sem afetar negativamente o desempenho protetor.

Por mais que os estudos acerca da atividade antibacteriana das nanopartículas de prata estejam cada vez mais atraindo os pesquisadores, a possibilidade de aglomeração das AgNPs pode causar uma diminuição dessas atividades, além de uma maior toxicidade contra células normais. O óxido de grafeno tem sido estudado para utilização como base para o crescimento e dispersão de AgNPs (Phong *et al.*, 2024). Ainda, Herrera-Rodriguez e colaboradores (Herrera-Rodriguez *et al.*, 2023), em seu estudo utilizaram uma rota com de *Tamarix gallica* para reduzir simultaneamente íons de prata e óxido de grafeno (GO), e formar o nanocompósito AgNPs/GO, comprovando também seu caráter antibacteriano, sendo mais eficaz contra *Staphylococcus aureus*.

Nanopartículas de prata incorporadas ao óxido de grafeno também foram utilizadas no estudo de Li e colaboradores (Li *et al.*, 2014). Os autores desenvolveram um tipo de curativo líquido com propriedades antimicrobianas, além da biocompatibilidade e capacidade de cicatrização.

A síntese de um nanocompósito contendo AgNPs e GO pode ser realizada de diversas maneiras. Uma revisão das diferentes abordagens, efeitos e aplicações foi desenvolvida no trabalho de Hai e colaboradores (Hai *et al.*, 2023). Os autores mencionam que é possível a



interação do GO com as AgNPs por diversas maneiras, como por meio de adsorção física, transferência de elétrons, interações  $\pi$ - $\pi$  ou ligação eletrostática com grupos funcionais contendo oxigênio, sendo ele um suporte para reduzir a auto aglomeração. Ainda segundo os autores, o desempenho quanto às ações antibacterianas pode ser atribuído à grande área de contato e às bordas do GO que podem danificar as paredes celulares.

Nanocompósitos mistos de GO e AgNPs também foram estudados para utilização em atividades antibacterianas para revestimentos têxteis médicos (Lange *et al.*, 2022). Os autores apresentaram resultados com otimização do efeito antibacteriano do compósito quando comparado ao efeito da AgNPs simples, mostrando que quando as células bacterianas são tratadas com o nanocompósito, ocorre o rompimento da membrana celular microbiana, contribuindo ainda para a morte celular o estresse oxidativo e peroxidação lipídica.

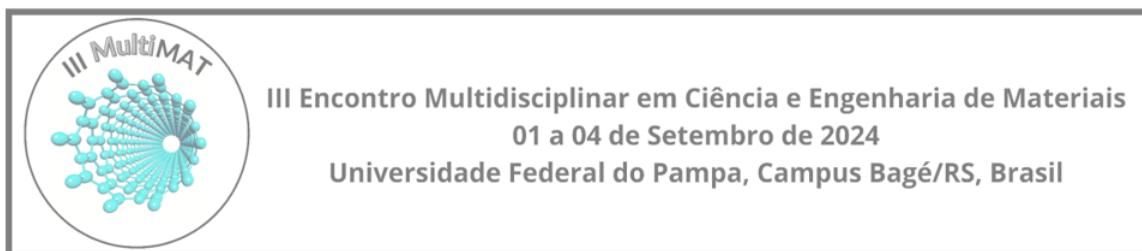
Uma interessante abordagem no que diz respeito á propriedades antivirais foi realizada por Crane e colaboradores (Crane *et al.*, 2021), os quais testaram propriedades antivirais “*in vitro*” de materiais compósitos de nanopartículas de óxido de grafeno e prata, contra Influenza A e Coronavírus OC43. Os autores concluíram que o material proporcionou a inibição da formação das placas por ambos os vírus, com apenas um minuto de exposição.

Quanto às pesquisas relacionadas às emulsões acrílicas, principalmente à base d’água – as quais se encontram em amplas aplicações, tais como tintas e revestimentos -, nota-se um crescimento na busca de alternativas de melhoria de suas propriedades. Algumas aplicações significativas na indústria da construção civil são para preservação em revestimentos arquitetônicos, resistência às intempéries e à sujeira (Tian *et al.*, 2024).

A pesquisa de Melo e colaboradores (Melo *et al.*, 2024) analisa o desempenho de alguns tipos de tintas disponíveis no mercado quanto à aplicabilidade para conservação de fachadas de edifícios históricos. A avaliação se deu, entre outros fatores, quanto ao fator permeabilidade ao vapor, lavabilidade e aderência, concluindo que as tintas à base de silicato podem ser consideradas as mais adequadas para preservação de revestimentos históricos. Os autores ainda demonstram a importância da aplicação das tintas e avaliação de seu desempenho considerando a compatibilidade com cada substrato, enfatizando a importância da mitigação do crescimento de fungos e da capacidade de impermeabilização das tintas, forçando assim a resistência da estrutura aos efeitos nocivos da água.

Ke e colaboradores (Ke *et al.*, 2023), em seu estudo, preparam látex de poliacrilato modificados com silano e dispersão de nanopartículas de óxido de estanho e antimônio (ATO) para revestimentos transparentes isolantes de calor para utilização em vidros externos de edifícios, comprovando por TGA que a estabilidade térmica dos revestimentos nanocompósitos foi aprimorada pela introdução de ATO.

Ainda em outra pesquisa realizada por Joshi e colaboradores (Joshi *et al.*, 2024), óxido de grafeno reduzido foi utilizado como aditivo antibacteriano para uma tinta acrílica de parede. A sintetização da nanoformulação foi realizada pelo acoplamento de óxido de grafeno reduzido e um peptídeo antimicrobiano usando uma abordagem de reticulação covalente. Alguns resultados encontrados foram a capacidade de resistir ao desgaste



associado a arranhões, abrasões e estragos, além de atividade bactericida para vários tipos de bactérias de 2 a 3x maior que as tintas antimicrobianas comerciais.

Sendo assim, diversos estudos comprovam que a junção destes dois nanomateriais – óxido de grafeno e nanopartículas de prata – inclusive aplicados a matrizes poliméricas, podem proporcionar uma variedade de propriedades inovadoras, as quais são dependentes de fatores como síntese, morfologia, tamanho de folha, entre outros. De acordo com os artigos pesquisados, nota-se que a concentração dos nanomateriais é um fator crucial para o seu desempenho antibacteriano, e que o óxido de grafeno mostra-se promissor na síntese juntamente às nanopartículas de prata por um dos fatores ser o impedimento da aglomeração das mesmas, o que influencia diretamente nas propriedades do nanomaterial, e em consequência, do nanocompósito.

#### 4 CONCLUSÃO

A revisão aqui apresentada mostrou de forma sucinta algumas recentes pesquisas a respeito do óxido de grafeno e nanopartículas de prata, nanomateriais que incorporados em matrizes poliméricas podem agregar propriedades interessantes para as mais diversas aplicações. A partir dos resultados obtidos pôde-se verificar que as pesquisas estão em crescente evolução, mostrando o potencial destes materiais e a busca incansável pela sustentabilidade e inovação no ramo da engenharia de materiais. Quanto às perspectivas futuras quanto ao tema, sugere-se aprimorar a pesquisa quanto às outras propriedades em revestimentos, tais como proteção aos raios ultravioleta.

#### 5 AGRADECIMENTOS

LPM-UFPEL, GQMATE-UFSM, URCAMP, CAPES, FAPERGS, CNPq, INCT Nanocarbono, INCT NanoVida

#### 6 REFERÊNCIAS

- ALAVI, M., ASHENGROPH, M. Mycosynthesis of AgNPs: mechanisms of nanoparticle formation and antimicrobial activities. *Expert Review of Anti-Infective Therapy*, 21(4), 355–363, 2023.
- BOKOBZA, L. Mechanical and electrical properties of elastomer nanocomposites based on different carbon nanomaterials. *C—Journal of Carbon Research*, v. 3, n. 2, p. 10, 2017.
- CALOVI, Massimo *et al.* Colloidal silver as innovative multifunctional pigment: The effect of Ag concentration on the durability and biocidal activity of wood paints. *Progress in Organic Coatings*, v. 175, p. 107354, 2023.
- CRANE, M. J.; DEVINE, S.; JAMIESON, A. Graphene oxide/silver nanoparticle ink formulations rapidly inhibit influenza A virus and OC43 coronavirus infection in vitro. *bioRxiv*, 2021.

- FU, S. *et al.* Some basic aspects of polymer nanocomposites: A critical review. **Nano Materials Science**, v. 1, n. 1, p. 2-30, 2019.
- HAI, N. D. *et al.* A review on the chemical and biological synthesis of silver nanoparticles@graphene oxide nanocomposites: A comparison. **Materials Today Sustainability**, v. 24, p. 100544, 2023.
- HERRERA-RODRÍGUEZ, A. *et al.* AgNPs/GO nanomaterial by a simple method and studied its antibacterial properties. **Applied Physics A**, v. 129, n. 12, 2023.
- JOSHI, S. *et al.* Peptide-reduced graphene oxide based functional paint: A sustainable alternative to toxic biocides. **Progress in Organic Coatings**, v. 195, p. 108636, 2024.
- KE, A. *et al.* Facile construction of transparent and heat-insulating coatings with ATO nanoparticles and silane-modified polyacrylate latex by redox initiation. **Colloid and Polymer Science**, v. 301, n. 6, p. 587-598, 2023.
- LANGE, A. *et al.* Nanocomposites of Graphene Oxide—Silver Nanoparticles for Enhanced Antibacterial Activity: Mechanism of Action and Medical Textiles Coating. **Materials** 2022, 15, 3122.
- LI, *et al.* AgNPs-GO Liquid Bandage is antibacterial and accelerates cutaneous wound healing in mouse model. **Materials Today Communications**, v. 39, p. 109135, 2024.
- MATOS, C.F. **Materiais nanocompósitos multifuncionais formados por látices poliméricos e grafeno ou óxido de grafeno: síntese, caracterização e propriedades**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2015.
- MATOS, C. F. *et al.* Graphene oxide as a surfactant in the nanostructuring of a conduction polymer: Effect on the electronic structure, chain orientation, and charge transfer dynamics. **Organic Electronics**, v. 75, p. 105440, 2019.
- MEHL, H. **Nanocompósitos constituídos por grafeno e nanopartículas metálicas: síntese, caracterização e aplicação**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015.
- MELO, R.H.R.Q. *et al.* Performance and Durability of Paints for the Conservation of Historic Façades. **Buildings**, v. 14, n. 4, p. 1016, 2024.
- PHONG, M.T. *et al.* Evaluation of green-synthesized of silver nanoparticle-loaded graphene oxide (AgNPs@ GO) nanocomposite toward biological wastewater filtration. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, p. 100765, 2024.
- SÁ, E. M. F., *et al.* **Síntese de nanopartículas de prata para obtenção de nanocompósito e avaliação da atividade bactericida em poliestireno expansível**. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.
- SILVEIRA, D.T.; CÓRDOVA, F.P. A pesquisa científica. **Métodos de pesquisa**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009. p. 33-44, 2009.
- TIAN, X. *et al.* Recent advancement in synthesis and modification of water-based acrylic emulsion and their application in water-based ink: A comprehensive review. **Progress in Organic Coatings**, v. 189, p. 108320, 2024.
- ZHU, Y. *et al.* Graphene and graphene oxide: synthesis, properties, and applications. **Advanced materials**, v. 22, n. 35, p. 3906-3924, 2010.

# POLYMER NANOCOMPOSITES FOR APPLICATION AS THERMAL AND ANTIMICROBIAL SMART-COATING IN CIVIL CONSTRUCTION

Fernanda Vieira Barasuol<sub>1</sub>, Nicholas Fernandes de Souza<sub>1</sub>, Carolina Ferreira de Matos Jauris<sub>2</sub>, Fernando Machado Machado<sub>3</sub>

<sub>1</sub>Universidade Federal de Pelotas, <sub>2</sub>Universidade Federal de Santa Maria (*QUÍMICA*),

<sub>3</sub>Universidade Federal de Pelotas (*Technology Development Center (CDTEc)*)

e-mail: [nanda.barasuol@gmail.com](mailto:nanda.barasuol@gmail.com)

Innovative alternatives in civil engineering using polymeric materials with nanometric reinforcements are the subject of recent studies due to the need to improve the performance of buildings in the civil construction [1]. Graphene oxide (GO) and silver nanoparticles (AgNPs) are good candidates for this goal. GO is a graphene-based nanomaterial with interesting chemical, mechanical and thermal properties. Silver nanoparticles can control the growth of many pathogens. In this research, hybrid materials of GO and AgNPs were used as reinforcements in acrylic polymer matrices for application as smart-ink in civil construction. The first part involved synthesizing precursor materials and an experimental optimization of nanocomposites. The chosen method was based on latex technology, mixing the GO and AgNPs dispersions with the latex [2]. The nanomaterials were characterized by atomic force microscopy (AFM) in topography, nanomechanics mode, scanning electron microscopy (SEM), and infrared and Raman spectroscopies. The results have demonstrated a good interaction between the nanocomposite components. SEM indicates a good homogeneity of the materials and GO adherence to the polymer. AFM images show that the insertion of GO and the AgNPs increases the adhesiveness and elastic modulus of the polymer. In the next steps, we will evaluate antimicrobial activity and, through experiments and computational calculations, estimate the thermal properties of the materials. Rheological analyses and other technological characterizations will also be carried out per technical standards. This work is expected to develop nanocomposites with antimicrobial characteristics and thermal properties that can be used for civil construction.

Acknowledgements:

LPM, CAPES, FAPERGS, CNPq, INCT Nanocarbono e INCT NanoVida

References:

[1] DIAS, LIR; RAMOS, EC; FLORENCIO, O. Brazilian Journal of Development, v.7, n.1, p.5972-5989, 2021.

[2] MATOS, CF. GALEMBECK, F and ZARBIN, AJG.

## ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E CIENTOMÉTRICA DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA SOBRE ÓXIDO DE GRAFENO E NANOPARTÍCULAS DE PRATA

FERNANDA VIEIRA BARASUOL<sup>1</sup>; NICHOLAS FERNANDES DE SOUZA<sup>2</sup>;  
 CAROLINA FERREIRA DE MATOS JAURIS<sup>3</sup>; FERNANDO MACHADO  
 MACHADO<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Centro Universitário da Região da Campanha – fernandabarasuol@urcamp.edu.br

<sup>2</sup>Universidade Federal de Pelotas - nicholasfs97@gmail.com

<sup>3</sup>Universidade Federal de Santa Maria - carolina.matos@uftsma.br

<sup>4</sup>Universidade Federal de Pelotas - fernando.machado@ufpel.edu.br

### 1. INTRODUÇÃO

Os nanomateriais 2D – estruturas bidimensionais formadas por camadas únicas de átomos que formam uma rede plana - como o grafeno (e seus derivados) - apresentam propriedades elétricas, mecânicas e outras diferentes dos materiais em maior escala (DE ABREU *et al.*, 2024). Um dos derivados bidimensionais do grafeno em sua forma oxidada, o óxido de grafeno (GO), conta com uma estrutura de grupos funcionais – epóxi, hidroxila, carboxílico, entre outros - facilitadores no processo de dispersão em solventes aquosos (SINGH *et al.*, 2018). Ainda, em termos sustentáveis, o GO é mais facilmente extinto que o grafeno em si, tornando sua utilização mais benéfica ao meio ambiente.

As nanopartículas de prata (AgNPs) são outros exemplos de nanomateriais que apresentam características interessantes, como propriedades antimicrobianas e baixa resistência elétrica e térmica, sendo um dos nanomateriais muito utilizados em uma grande variedade de produtos e aplicações (ISLAM, JACOB e ANTUNES, 2021). Ainda, estes dois materiais – AgNPs e GO -, quando utilizados como reforços em materiais nanocompósitos, podem, sinergicamente, atribuir e/ou melhorar muitas propriedades da matriz.

Muitos estudos estão em constante atualização a respeito desses dois materiais para aplicação em grande escala, o que objetivou a proposta deste trabalho. Nesta pesquisa, foram analisados indicadores da produção científica em relação aos dois nanomateriais. Foram realizadas análises bibliométricas, cienciométricas e estatísticas, onde pode-se analisar de forma quantitativa os artigos publicados em um período determinado, assim como as palavras-chave.

### 2. METODOLOGIA

Para a análise bibliométrica, foi utilizado como banco de dados a base da *Web Of Science*™, pela alta disponibilidade dos periódicos. Foi pesquisado por “Tópico” as palavras “silver nanoparticles and graphene oxide”, e como filtro foram utilizadas as informações dos artigos pela relevância e ano de publicação - entre 2021 e 2024.

O software VOSViewer (versão 1.6.20/2023) foi utilizado para realizar a análise das

co-ocorrências de palavras-chave e o programa RStudio para a nuvem de palavras. Na Figura 1, pode-se observar as etapas para a realização do estudo:

Figura 1 – Etapas da pesquisa



### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Etapa 1: Análise bibliométrica da produção de publicações

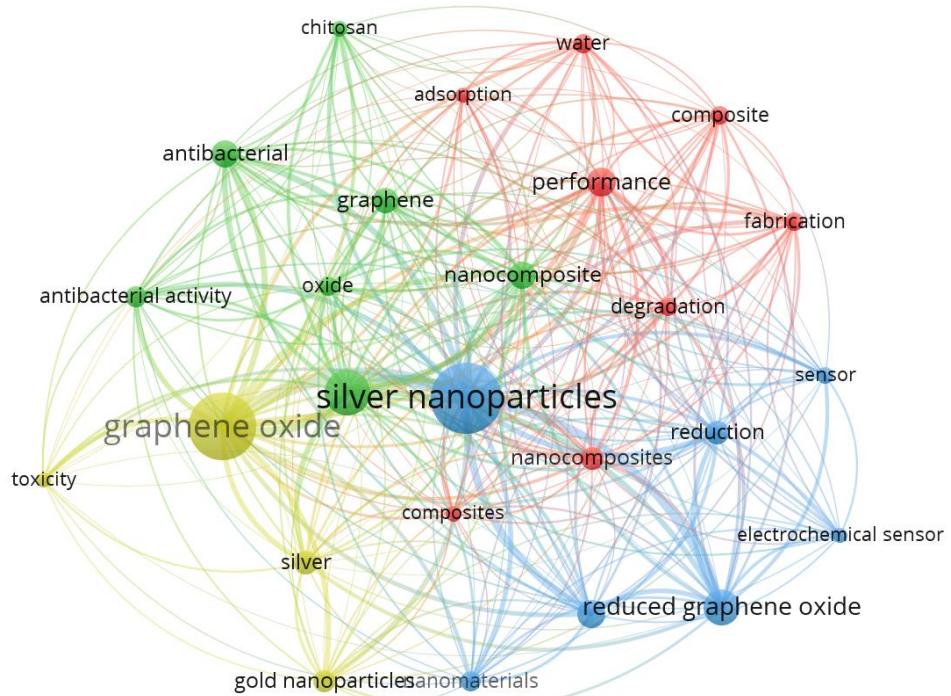
Ao todo, 2.359 publicações com o tópico “silver nanoparticles and graphene oxide” foram selecionadas no banco de dados da plataforma *Web Of Science*™, no período compreendido entre 2021 e 2024.

#### 3.2 Etapa 2: Análise cienciométrica: Co-ocorrência de palavras-chave

Para a análise de co-ocorrência de palavras-chave, foram selecionados os 401 artigos do ano de 2024, e as palavras-chave que ocorreram mais de 20 vezes. Segundo Dos Santos e Quadros (2020), pode-se visualizar as palavras-chave mais frequentes no mapa de co-ocorrência no VOSViewer. As redes de ligação mostram quais são citadas juntas. Locais onde o círculo aparece maior, são artigos onde, no conjunto, é a maior ocorrência das mesmas. Já as cores, são os grupos de termos os quais são citados juntos (Figura 2).



Figura 2: Mapa de redes



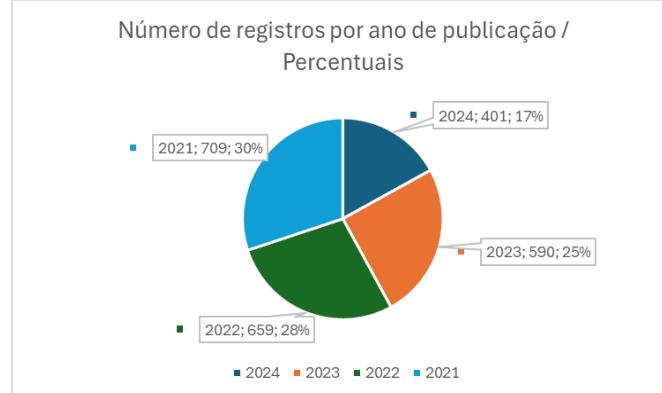
Das 2305 palavras-chave, 26 se enquadram no filtro aplicado. As palavras-chave que mais tiveram ocorrências foram “silver nanoparticles – 190, “graphene oxide” – 177, “nanoparticles” – 101, “reduced graphene oxide” - 72, e “performance” – 53.

### **Etapa 3:**

#### **3.1 Análise estatística: Publicação por ano:**

A Figura 3 apresenta o número de publicações sobre o tema entre o período de 2021 a 2024. Pode-se observar que o ano de 2021 apresentou o maior número de publicações, com um total de 709, seguido do ano de 2022 e 2023, respectivamente.

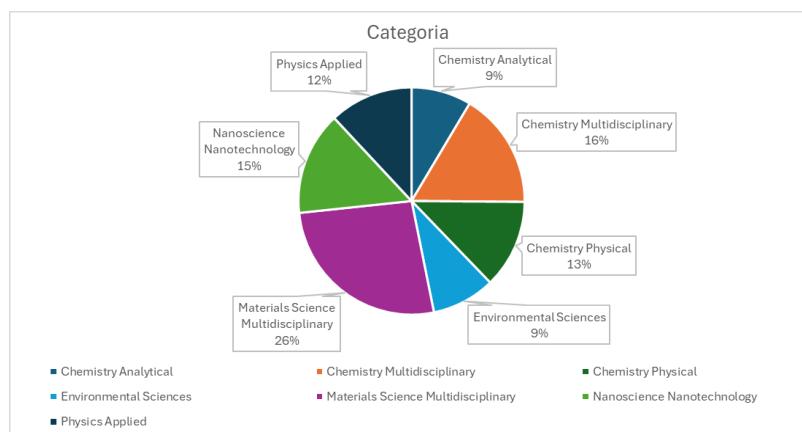
Figura 3: Número de registros por ano de publicação



Sobre a análise dos tipos de documentos, em primeiro lugar, 77% dos trabalhos publicados são na forma de artigos, seguido por 19% na forma de artigos de revisão, 3% do tipo acesso antecipado e 1% em anais.

A respeito da categoria das publicações (Figura 4), 26% encontram-se na categoria “ciência dos materiais multidisciplinar”, 16% na categoria “química multidisciplinar”, 15% em “nanociência e nanotecnologia”, 13% em “química física”, 12% em “física aplicada” e 9% em “química analítica” e “ciências ambientais”.

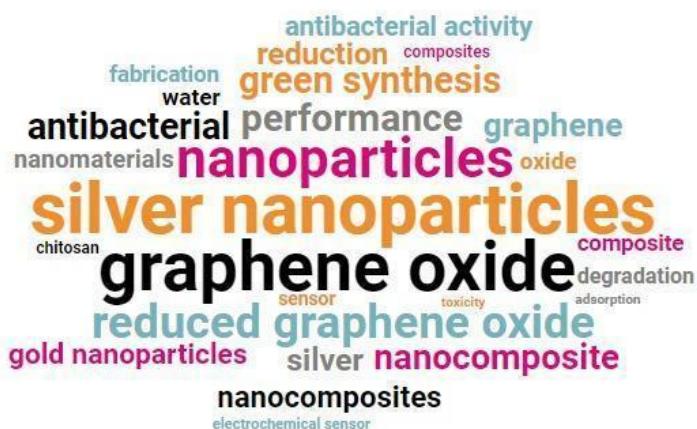
**Figura 4: Categoria das publicações**



### 3.2: Nuvem de palavras-chave

A frequência das palavras-chave é apresentada na nuvem de palavras (Figura 5) desenvolvida no programa *RStudio*. De acordo com os dados estatísticos, “silver nanoparticles” foi a palavra-chave mais frequente, seguida de “graphene oxide”, “nanoparticles”, “reduced graphene oxide” e “performance”.

**Figura 5: Nuvem de palavras**



## 4. CONCLUSÕES

É possível concluir com esta pesquisa a importância das análises realizadas, visto que pode-se obter um apanhado geral das pesquisas sobre o tema na área

de nanocompósitos, os quais estão em notável evolução, comprovada pela quantidade de artigos publicados na área nos últimos anos. Salienta-se principalmente questões relativas às atividades antibacterianas das nanopartículas de prata e suas potenciais aplicações, além das propriedades do óxido de grafeno e sua ação sinérgica com as nanopartículas de prata, sendo promissor este estudo para aplicações futuras em nanocompósitos.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DE ABREU, Letícia Gambert et al. Nanomateriais bidimensionais em engenharia: propriedades e aplicações. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 6, p. e5248-e5248, 2024.

DOS SANTOS, Glicia Vieira; QUADROS, Ruy. Capacidades dinâmicas para a transformação digital: uma análise bibliométrica exploratória com VOSviewer. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 15, n. 7, p. e3970-e3970, 2024.

ISLAM, Md Anwarul; JACOB, Mohan V.; ANTUNES, Elsa. A critical review on silver nanoparticles: From synthesis and applications to its mitigation through low-cost adsorption by biochar. **Journal of Environmental Management**, v. 281, p. 111918, 2021.

SINGH, Dinesh Pratap et al. Graphene oxide: An efficient material and recent approach for biotechnological and biomedical applications. **Materials Science and Engineering: C**, v. 86, p. 173-197, 2018.