

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ROBLEDO CÁSSIO DA COSTA

**TUNGSTATO DE PRATA COMO ADITIVO PARA TINTAS IMOBILIÁRIAS:
ESTUDO DE PROPRIEDADES E POTENCIAL DE USO**

CURITIBA

2025

ROBLEDO CÁSSIO DA COSTA

**TUNGSTATO DE PRATA COMO ADITIVO PARA TINTAS IMOBILIÁRIAS:
ESTUDO DE PROPRIEDADES E POTENCIAL DE USO**

**Silver tungstate as an additive for architectural paints: study of properties and
potential use**

Trabalho de conclusão de curso de Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Dr. Eduardo Borges Lied

CURITIBA

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba**



ROBLEDO CASSIO DA COSTA

TUNGSTATO DE PRATA COMO ADITIVO PARA TINTAS IMOBILIÁRIAS: ESTUDO DE PROPRIEDADES E POTENCIAL DE USO

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Área de concentração: Meio Ambiente.

Data de aprovação: 17 de Abril de 2025

Eduardo Borges Lied, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Janine Nicolosi Correa, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Rita Mirele Patron Chaves, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 17/04/2025.

Dedico este trabalho à minha mãe Elaine Isabel, pedagoga e professora que me ensinou o caminho da educação e ao meu companheiro Felipe Barbosa, doutor em farmácia, que me inspirou a seguir na jornada acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Ao Universo, minha gratidão por esse rico caminho de conhecimentos e descobertas trilhado.

Agradeço ao meu orientador, professor Dr. Eduardo Borges Lied, pela generosidade de tempo investido, sabedoria e técnicas com que me guiou nesta trajetória. Também ao professor Dr. Paulo Rodrigo Stival Bittencourt, pelas contribuições com suas análises de caracterização.

À Secretaria do Curso, pela cooperação e a todo o corpo docente pela didática, companheirismo e risadas ao longo dos trabalhos, em especial a prof.^a Dra. Janine, pela dedicação e leveza que, com maestria, me inspirou na arte da escrita.

Gostaria de deixar registrado, também, o meu reconhecimento à minha família como um todo, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

“Há muitas razões para duvidar e uma só para crer” (ANDRADE, 2019).

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise bibliométrica, patentométrica e experimental sobre a aplicação do tungstato de prata (Ag_2WO_4) como aditivo antimicrobiano em tintas imobiliárias. A pesquisa mapeou a produção científica e tecnológica, identificando as principais tendências, redes de colaboração e áreas de maior impacto. A metodologia incluiu a coleta de dados em bases indexadas, como Web of Science e Scopus, e a síntese experimental do tungstato de prata nas fases alfa, beta e gama, por meio de precipitação química. As amostras foram caracterizadas por técnicas de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Difração de Raios-X (DRX), Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e análise térmica (TGA). Os resultados revelaram que a fase beta apresentou menor cristalinidade e maior irregularidade morfológica, características que se correlacionaram com a melhor atividade antimicrobiana, com Concentração Inibitória Mínima (CIM) de 16 $\mu\text{g/mL}$ contra *Escherichia coli*. Já as fases gama e alfa apresentaram maior organização estrutural, mas atividade antimicrobiana reduzida. A bibliometria apontou um crescimento significativo nas pesquisas sobre biocidas para tintas nos últimos 10 anos. A patentometria mostrou um aumento nos depósitos de patentes relacionados a tintas biocidas, sugerindo a viabilidade da transferência do conhecimento acadêmico para o setor industrial. Os testes com revestimentos de tinta acrílica demonstraram alterações de coloração, possivelmente devido à interação entre as nanopartículas e a matriz polimérica. Em conclusão, o tungstato de prata, especialmente na fase beta, mostrou-se promissor como aditivo antimicrobiano, com desafios a serem superados quanto à estabilidade das fases e ao impacto visual (estético). A pesquisa contribui para o desenvolvimento de revestimentos funcionais, alinhados às demandas de sustentabilidade e segurança na construção civil.

Palavras-chave: tungstato de prata; propriedades antimicrobianas; tintas biocidas; nanopartículas.

ABSTRACT

This study presents a bibliometric, patentometric, and experimental analysis of the application of silver tungstate (Ag_2WO_4) as an antimicrobial additive in architectural paints. The research mapped the scientific and technological production, identifying key trends, collaboration networks, and areas of greatest impact. The methodology included data collection from indexed databases such as Web of Science and Scopus, as well as the experimental synthesis of silver tungstate in its alpha, beta, and gamma phases through chemical precipitation. The samples were characterized using Scanning Electron Microscopy (SEM), X-ray Diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), and Thermal Analysis (TGA). The results revealed that the beta phase exhibited lower crystallinity and greater morphological irregularity, characteristics that correlated with the best antimicrobial activity, with a Minimum Inhibitory Concentration (MIC) of 16 $\mu\text{g}/\text{mL}$ against *Escherichia coli*. In contrast, the gamma and alpha phases showed higher structural organization but reduced antimicrobial activity. The bibliometric analysis indicated significant growth in research on biocides for paints over the past 10 years. The patentometric analysis revealed an increase in patent filings related to biocidal paints, suggesting the feasibility of transferring academic knowledge to the industrial sector. Tests with acrylic paint coatings demonstrated color changes, possibly due to interactions between the nanoparticles and the polymer matrix. In conclusion, silver tungstate, particularly in the beta phase, proved to be a promising antimicrobial additive, though challenges remain regarding phase stability and visual (aesthetic) impact. This research contributes to the development of functional coatings aligned with sustainability and safety demands in the construction industry.

Keywords: silver tungstate; antimicrobial properties; biocidal paints; nanoparticles.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diferentes mecanismos de ação dos íons de prata nas bactérias	38
Figura 2 - Imagens de (a) α -Ag ₂ WO ₄ , (b) β -Ag ₂ WO ₄ e (c) γ -Ag ₂ WO ₄ sintetizados em diferentes proporções de concentração de precursores	46
Figura 3 - Estrutura α -ortorrômbica- α -Ag ₂ WO ₄	50
Figura 4 - Nanocristais α -Ag ₂ WO ₄ obtidos por MEV	51
Figura 5 - Representação esquemática de célula unitária correspondente (b) β -Ag ₂ WO ₄ hexagonal	52
Figura 6 Nanocristais β -Ag ₂ WO ₄ obtidos por MEV	52
Figura 7 - Representação poliédrica da célula unitária γ -Ag ₂ WO ₄	53
Figura 8 - Nanocristais γ -Ag ₂ WO ₄ obtidos por MEV	54
Figura 9 - Procedimentos aplicados na síntese dos diferentes polimorfos de materiais à base de Ag ₂ WO ₄	57
Figura 10 - Esquema proposto para o mecanismo de inibição antimicrobiana utilizando os microcristais de α -Ag ₂ WO ₄	59
Figura 11 - Processo de síntese do tungstato de prata em suas 3 fases polimorfas pelo método de precipitação	68
Figura 12 - Tubo de ensaio com sua concentração equivalente para comparação da escala Mc Farland com a adição da solução microbiana	70
Figura 13 - Tipos de documentos	72
Figura 14 - Produção científica por país	78
Figura 15 - Produção de tintas biocidas	118
Figura 16 - Micrografias das amostras de tungstato de prata (Ag ₂ WO ₄) em sua fase alfa (α)	123
Figura 17 - Micrografias das amostras de tungstato de prata (Ag ₂ WO ₄) em sua fase beta (β)	124
Figura 18- Micrografias das amostras de tungstato de prata (Ag ₂ WO ₄) em sua fase gama (γ)	125
Figura 19 - Mapeamento elementar dos constituintes Prata (Ag) e Tungstênio (W) para as amostras de (a) alfa, (b) beta e (c) gama	130
Figura 20 - Superfícies revestidas com tinta acrílica com e sem aditivo a base de tungstato de prata	136

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Produção de tintas no Brasil	17
Gráfico 2 - Relação entre a produção anual e o número de citações	73
Gráfico 3 - Produção científica por autores	75
Gráfico 4 - Produção científica mais citadas	76
Gráfico 5 - Países citados	77
Gráfico 6 - Frequência de uso das palavras ao longo dos anos	80
Gráfico 7 - Produção científica por Instituição	84
Gráfico 8 - Tendências de pesquisas	90
Gráfico 9 - Produção científica anual	94
Gráfico 10 - Relação entre a produção anual e o número de citações	95
Gráfico 11 - Autores mais relevantes e números de citações	97
Gráfico 12 - Produção científica mais citadas	99
Gráfico 13 - Países citados	100
Gráfico 14 - Produção científica por instituição	101
Gráfico 15 - Diagrama de Sankey	102
Gráfico 16 - Tendências de pesquisas	105
Gráfico 17 - Códigos IPC - International Patent Classification	112
Gráfico 18 - Série temporal dos depósitos de patentes sobre tintas biocidas no Brasil	117
Gráfico 19 - Agentes antimicrobianos	121
Gráfico 20 - Difratoograma de DRX das amostras de α -Ag ₂ WO ₄	126
Gráfico 21 - Difratoograma de DRX das amostras de β -Ag ₂ WO ₄	127
Gráfico 22 - Difratoograma de DRX das amostras de γ -Ag ₂ WO	127
Gráfico 23 - Espectro de EDS para as amostras de tungstato de prata: (a) alfa; (b) beta; (c) gama	129
Gráfico 24 - Valores de luminosidade dos revestimentos de tinta acrílica branca aditivada em diferentes teores de Ag ₂ WO ₄	137

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos revestimentos funcionais	23
Quadro 2 - Composição das tintas	24
Quadro 3 - Processo de produção de tintas	25
Quadro 4 - Aditivos utilizados nas formulações de tinta	29
Quadro 5 - Principais constituintes das tintas	30
Quadro 6 - Classificação das tintas imobiliárias	31
Quadro 7 - Classificação dos biocidas	36
Quadro 8 - Resumo das atividades de tintas antibacterianas	40
Quadro 9 - Marcas Brasileiras de tintas antimicrobianas	41
Quadro 10 - Linha do tempo das pesquisas com tungstato de prata	43
Quadro 11 - Fluxograma da pesquisa	60
Quadro 12 - Exemplo de quadro metodológico de análises bibliométricas	64
Quadro 13 - Metodologias analíticas de caracterização física, química e mineralógica dos materiais	dos 68
Quadro 14 - Estrutura e classificação dos temas de pesquisa	81
Quadro 15 - Rede de coocorrência	83
Quadro 16 - Periódicos científicos mais influentes do campo tintas biocidas	83
Quadro 17 - Diagrama de Sankey	86
Quadro 18 - Rede de co-citações	88
Quadro 19 - Histograma de histórico de citações	89
Quadro 20 - Periódicos científicos mais influentes do campo de tungstato de prata	103
Quadro 21 - Árvore de palavras	104
Quadro 22 - Mapa de coocorrência	106
Quadro 23 - Detalhes de link temático	107
Quadro 24 - Mapa temático formado pelas palavras-chave dos autores	108
Quadro 25 - Rede de co-citações sobre produções relacionados ao tungstato de prata	109
Quadro 26 - Histograma de histórico de citações	111
Quadro 27 - Códigos IPC - International Patent Classification	114
Quadro 28 - Tipos de patentes e titularidade	119
Quadro 29 - Nuvem de palavras relacionadas às tintas antimicrobianas	122
Quadro 30 - Análise térmica (TGA e DSC) das amostras de Tungstato de Prata. (A1: alfa; A2: beta; A3: gama)	
Quadro 31 - Espectro do infravermelho das amostras de tungstato de prata	131
Quadro 32 - Resultados do teste de CIM para α , β e γ -Ag_2 WO_4 utilizando E. coli	133
Quadro 33 - Resumo dos resultados dos ensaios de atividade antimicrobiana	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Levantamento e filtragem dos dados bibliométricos	63
Tabela 2 - String de busca e filtros	65
Tabela 3 - String de busca e filtros	66
Tabela 4 - Soluções com diferentes concentrações de Ag_2WO_4 para a determinação da CIM	71
Tabela 5 - Informações gerais	72
Tabela 6 - Mapa de árvore de palavras	79
Tabela 7 - Tungstato de prata, informações gerais	92
Tabela 8 - Tungstato de Prata, informações gerais	93
Tabela 9 - Produção dos autores ao longo do tempo	98
Tabela 10 - Códigos IPC citados	115

LISTA DE ABREVIATURAS

CIM	Concentração Inibitória Mínima
DRS	Refletância Difusa (Diffuse Reflectance Spectroscopy)
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
EDS	Espectroscopia de Dispersão de Energia de Raios-X
FTIR-ATR	Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier e Refletância Total Atenuada
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
TGA	Termogravimetria
XPS	Espectroscopia de Fotoelétrons de Raios-X
XRD	Difração de Raios-X

LISTA DE SIGLAS

CIP	Classificação Internacional de Patentes
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
CPC	Cooperative Patent Classification (Classificação Cooperativa de Patentes)
COVID-19	Doença causada pelo vírus SARS-CoV-2
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial
IPC	International Patent Classification (Classificação Internacional de Patentes)
ROS	Espécies Reativas de Oxigênio (Reactive Oxygen Species)
UFSCAR	Universidade Federal de São Carlos
UNESP	Universidade Estadual Paulista

LISTA DE SÍMBOLOS

A_2BO_4	Estrutura cristalina do tipo espinélio
Ag^+	Íon Prata
$AgI-Ag_2WO_4$	Mistura de Iodeto de Prata e Tungstato de Prata
$AgNP's$	Nanopartículas de Prata
$AgNO_3$	Nitrato de Prata
AgO	Óxido de Prata (I)
AgO_2	Dióxido de Prata
AgO_5	Óxido de Prata com configuração específica
AgO_6	Octaedro de Óxido de Prata
AgO_7	Heptaóxido de Prata
$AgOx$	Óxido de Prata de estequiometria variável
Ag_3PO_4	OrtoFosfato de Prata
Ag_3VO_4	OrtoVanadato de Prata
Ag_2WO_4	Tungstato de Prata
$\alpha-Ag_2WO_4$	Fase alfa do Tungstato de Prata
$\beta-Ag_2WO_4$	Fase beta do Tungstato de Prata
$\gamma-Ag_2WO_4$	Fase gama do Tungstato de Prata
$AuNP's$	Nanopartículas de Ouro
CH_3OH	Metanol
CO_2	Dióxido de Carbono
H_2O	Água
Mo_8O_{23}	Óxido de Molibdênio
MWO_4	Tungstatos Metálicos
$Na_2WO_4 \cdot H_2O$	Tungstato de Sódio Monohidratado
$Na_2WO_4-Ag_2WO_4$	Mistura de Tungstato de Sódio e Tungstato de Prata
PVA	Acetato de Polivinilo
SiO_2-TiO_2	Mistura de Dióxido de Silício e Dióxido de Titânio
TiO_2	Dióxido de Titânio
TiO_2 Rutilo	Fase rutilo do Dióxido de Titânio
W_3O_8	Óxido de Tungstênio
W_5O_{14}	Óxido de Tungstênio com estrutura específica
WO_4	Tetraedro de Óxido de Tungstênio
WO_5	Pentóxido de Tungstênio
WO_6	Octaedro de Óxido de Tungstênio
WOy	Óxido de Tungstênio com estequiometria variável
ZnO	Óxido de Zinco
$ZnO-Ag$	Nanocompósito de Óxido de Zinco com Prata

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Objetivo geral.....	15
1.1.1 Objetivos específicos.....	15
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	16
2.1 Tintas.....	16
2.1.1 Tintas imobiliárias.....	16
2.1.2 Tecnologias aplicadas às tintas.....	18
2.2 Tecnologia dos materiais.....	19
2.2.1 Materiais inteligentes.....	19
2.2.2 Revestimentos funcionais.....	20
2.3 Composição das tintas.....	23
2.3.1 Resinas.....	25
2.3.2 Solventes.....	26
2.3.3 Pigmentos.....	27
2.3.4 Aditivos.....	28
2.4 Tintas imobiliárias.....	30
2.4.1 Tintas de base aquosa.....	32
2.5 Aditivos antimicrobianos em tintas.....	34
2.6 Tungstato de prata.....	41
2.6.1 Caracterização e estrutura.....	41
2.6.1.1 Estrutura α -ortorrômbica - α -Ag ₂ WO ₄	49
2.6.1.2 Estrutura β - hexagonal - β -Ag ₂ WO ₄	51
2.6.1.3 Estrutura γ -cubica - γ -Ag ₂ WO ₄	53
2.7 Síntese do tungstato de prata.....	54
2.7.1 Reação no estado sólido.....	55
2.7.2 Síntese sonoquímica.....	55
2.7.3 Síntese hidrotermal assistida por micro-ondas.....	55
2.7.4 Coprecipitação.....	56
2.7.5 Síntese hidrotérmica.....	56
2.7.6 Tungstato de prata e suas propriedades antibacterianas.....	58
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	61
3.1 Principais etapas da pesquisa.....	61
3.1.1 Fluxograma de pesquisa.....	61
3.2 Pesquisa teórica.....	61
3.2.1 Levantamento bibliométrico e prospecção tecnológica.....	61
3.2.2 Levantamento em bases de dados científicas.....	64
3.2.3 Prospecção tecnológica.....	66
3.3 Pesquisa experimental.....	67

3.3.1 Síntese do tungstato de prata (Ag_2WO_4).....	67
3.3.2 Caracterização do tungstato de prata.....	68
3.3.3 Teste para obtenção da Concentração Inibitória Mínima (CIM).....	69
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	72
4.1 Análise bibliométrica.....	72
4.1.1 Tintas biocidas.....	72
4.1.2 Tungstato de prata.....	91
4.2 Prospecção tecnológica de patentes.....	113
4.2.1 Definições.....	113
4.2.2 Patentometria.....	114
4.3 Resultados experimentais.....	122
4.3.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	122
4.3.2 Difratomia de raios X.....	126
4.3.3 Energia dispersiva de raios X.....	128
4.3.4 Termogravimetria e calorimetria exploratória diferencial.....	131
4.3.5 Espectroscopia de absorção na região do infravermelho.....	133
4.3.6 Teste antimicrobiano para obtenção da Concentração Inibitória Mínima (CIM).....	134
4.3.7 Aditivção de tungstato de prata em tinta acrílica.....	136
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	137
5.1 Conclusão.....	138
5.2 Perspectivas para pesquisas futuras.....	139
REFERÊNCIAS.....	141

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de proteger a saúde humana e o meio ambiente, incluindo o espaço construído, está impulsionando os pesquisadores e a indústria em todo mundo a buscarem materiais e soluções sustentáveis para combater os danos causados pela poluição e contaminantes biológicos. Recentemente, a descoberta de substâncias químicas de origem sintética ou derivadas de uma fonte natural, que oferecem riscos ambientais ou à saúde pública impulsionam esta discussão (España *et al.*, 2016).

Nesse contexto, a tinta se destaca como uma opção importante, podendo indicar sinais sobre os organismos contaminantes e, a partir de seus processos produtivos, soluções para tal questão (Sottomayor, 2019). Composta por uma dispersão de pigmentos em uma solução ou emulsão de polímeros, a tinta, quando aplicada a uma superfície, forma um filme seco aderente, que assegura higiene, limpeza, eficiência, iluminação, visibilidade e segurança.

No cenário atual das edificações, as tintas imobiliárias desempenham um papel fundamental na proteção e estética de ambientes residenciais, comerciais, escolares e hospitalares. O Brasil, é um dos cinco maiores mercados de tintas do mundo, possui uma indústria que oferece produtos de alta tecnologia para diversas aplicações, conforme destacado pela Associação Brasileira dos Fabricantes de Tintas (Abrafati, 2022).

Com o advento da nanotecnologia, o setor de tintas tem experimentado transformações inovadoras, especialmente na construção civil. As tintas modernas não apenas proporcionam um apelo estético, mas também incorporam funcionalidades avançadas, como: resistência a agentes químicos, proteção contra radiação ultravioleta e propriedades autolimpantes. Essas características são particularmente valorizadas em ambientes que exigem altos padrões de higiene e durabilidade.

Segundo Ghosh (2006), os "revestimentos funcionais" emergem como uma tendência importante, oferecendo benefícios adicionais além da simples decoração e proteção. Eles podem incluir capacidades antimicrobianas, isolantes térmicos e até mesmo a habilidade de autorreparação, destacando-se como uma resposta eficiente às demandas contemporâneas da construção civil.

Materiais inteligentes estão na vanguarda dessas inovações, de maneira que a contínua pesquisa e desenvolvimento de novos elementos é crucial, pois os materiais tradicionais muitas vezes não conseguem atender aos rigorosos requisitos de desempenho, sustentabilidade e eficiência energética exigidos hoje (Mukherjee *et al.*, 2021).

Dentro deste contexto de inovação, a implementação de novos métodos e materiais na construção civil está se expandindo rapidamente. Essas soluções avançadas redefinem os padrões de construção e promovem edificações mais seguras, duráveis e sustentáveis. A integração dessas tecnologias representa um passo significativo para um futuro mais sustentável e tecnologicamente avançado na construção civil. O que se percebe é que o mercado global de tintas e revestimentos nanoestruturados tem presenciado um crescimento significativo, com a inclusão de propriedades antimicrobianas, antivirais, anti-incrustantes, fotocatalíticas, de fácil limpeza ou autolimpantes, entre outros.

Em específico sobre as tintas, a sua composição se dá basicamente por pigmentos, resinas, solventes e aditivos, podendo ser voláteis ou não voláteis. Um destaque entre os aditivos são os antimicrobianos incorporados às tintas durante a fabricação. Esses aditivos ajudam a resistir, inibir e prevenir o crescimento de microrganismos, tornando os produtos mais higiênicos e prolongando sua vida útil. Esses revestimentos são cruciais no controle da propagação de infecções em ambientes de saúde, como hospitais e clínicas, e também em locais públicos, como escolas e escritórios. Embora não eliminem completamente a transmissão de infecções, eles reduzem significativamente o risco, contribuindo para um ambiente mais seguro e saudável.

Entre os materiais inovadores com ação antimicrobiana, a família dos tungstatos metálicos, especialmente o tungstato de prata (Ag_2WO_4), destaca-se por suas estruturas cristalinas e eletrônicas específicas, que oferecem grande variabilidade estrutural e ampla aplicabilidade técnica. O tungstato de prata, um semicondutor com três polimorfos conhecidos, tem propriedades fotocatalíticas e antimicrobianas notáveis, além de estabilidade química e fotoestabilidade.

A manipulação de materiais como o Ag_2WO_4 , em escala nanométrica, inseridos no cenário de criação de novos produtos, é altamente promissora. Diante da crescente demanda por ambientes mais seguros e higiênicos, a pesquisa e o

desenvolvimento de tintas antimicrobianas, utilizando materiais inovadores como o tungstato de prata, mostra-se essencial. A aplicação desses materiais não só melhora a proteção contra microrganismos, mas também contribui para a durabilidade e eficiência dos revestimentos, alinhando-se às necessidades contemporâneas de sustentabilidade e segurança.

1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é investigar o potencial do tungstato de prata como aditivo para tintas imobiliárias, analisando suas propriedades físico-químicas, estruturais e antimicrobianas, e fornecendo insights estratégicos para o desenvolvimento científico e tecnológico desse campo de estudo.

1.1.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- A. Mapear o estado da arte sobre biocidas para tintas imobiliárias por meio de análise bibliométrica e patentométrica;
- B. Investigar o potencial científico e tecnológico do uso do tungstato de prata como aditivo funcional;
- C. Realizar a síntese química do tungstato de prata nas fases alfa, beta e gama pelo método de precipitação;
- D. Caracterizar as propriedades físico-químicas, estruturais e antimicrobianas do tungstato de prata.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Tintas

O termo tinta tem origem em *acqua tinctoria*, do Latim, que significa água colorida (Tinta, 2024). Trata-se de uma mistura devidamente estabilizada de pigmentos e cargas em resina, formando uma película sólida, fosca ou brilhante, com a finalidade de proteger e embelezar uma determinada superfície (Canaude, 2022).

Segundo a NBR 12554 (ABNT, 2013), tinta é uma composição química formada por uma dispersão de pigmentos em uma solução ou emulsão de um ou mais polímeros, que, ao ser aplicada sobre uma superfície, transforma-se num filme seco a ela aderente com a finalidade de assegurar questões de higiene e limpeza, eficiência e iluminação, visibilidade e segurança.

As tintas desempenham um papel crucial na proteção contra agentes agressivos à estrutura, como ácidos, produtos alcalinos, abrasivos, microrganismos e radiação ultravioleta (UV), destacando-se por sua significativa contribuição no setor da construção civil (Sichinel; Santos, 2023). O progresso tecnológico tem impulsionado o desenvolvimento de técnicas especializadas no processo de manufatura de tintas, visando à redução da absorção de água, melhoria da higiene, resistência à abrasão e prevenção do crescimento de fungos.

2.1.1 Tintas imobiliárias

Existe uma ampla diversidade de tintas fabricadas à base de resinas vinílicas, acrílicas, alquídicas, epóxi, poliuretânicas, fenólicas, silicones, borracha clorada e, ainda, outras à base de cal, cimento, silicato, terra (Cristina; Anghinetti, 2012). A pintura por meio de tintas, pode proporcionar uma melhor higienização do ambiente, e também auxiliar na sinalização, identificação, isolamento e controle da intensidade luminosa, afetando psicologicamente as pessoas e criando sensações de bem-estar e segurança.

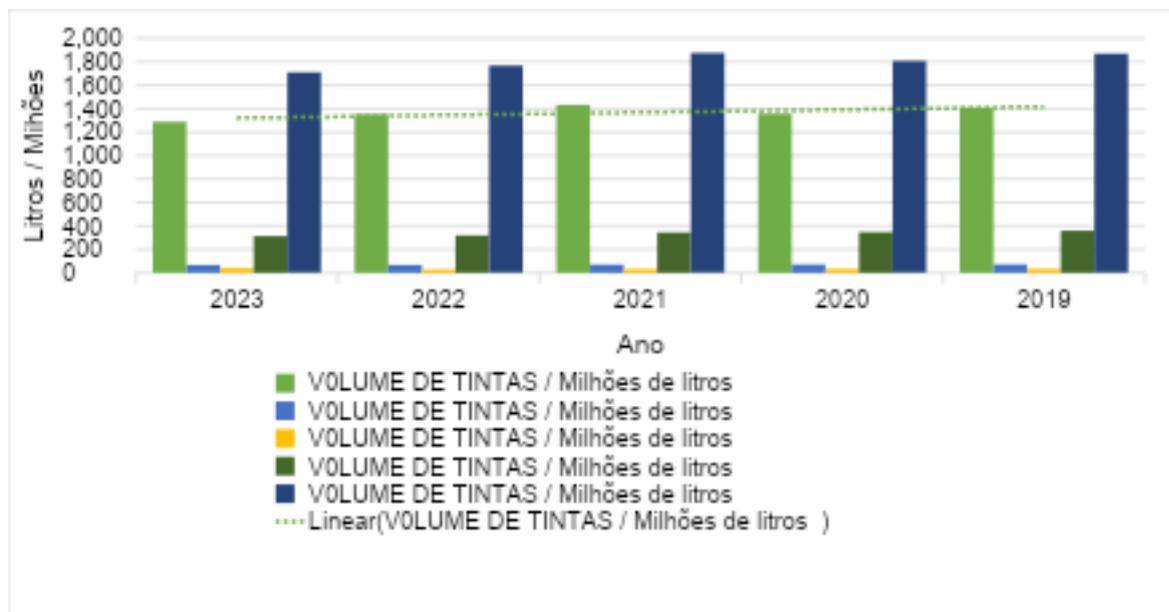
As tintas imobiliárias são utilizadas no revestimento de edificações, para uso residencial, comercial, escolar, hospitalar, dentre outros, e podem ser subdivididas em produtos aquosos (látex) e produtos à base de solvente orgânico - no tópico

Classificação dos Tipos de Tintas, os termos sobre essas tipologias serão aprofundados neste trabalho.

No território brasileiro, a indústria de tinta imobiliária, começou a se estabelecer no século XX, e os pioneiros do setor foram Paulo Hering (fundador das Tintas Hering), no estado de Santa Catarina, em Blumenau, e Carlos Kuenerz (fundador da Usina São Cristóvão), no Rio de Janeiro (RJ), que era então o Distrito Federal, ambos de origem alemã (Fazenda, 2009). A partir de então, atraídas pelo mercado em potencial, outras empresas começaram a se estabelecer e contribuir para desenvolver o setor, como Sherwin-Williams e Glasurit.

Atualmente, de acordo com a Associação Brasileira dos Fabricantes de Tintas (Abrafati), o Brasil é um dos cinco maiores mercados mundiais de tintas, fabricando tintas destinadas a todas as aplicações, com alta tecnologia e competência técnica (Abrafati, 2022). O **Gráfico 1** mostra os volumes da produção de tintas no Brasil e a tendência crescente de produção de tintas imobiliárias nos últimos 5 anos.

Gráfico 1 - Produção de tintas no Brasil



Nota: A produção de tintas imobiliárias no Brasil, equivale a 75,2% do volume total produzido no país no ano de 2023.

Fonte: Canaude (2022).

Nesse setor, divide-se as tintas em automotiva, para indústria em geral (eletrodomésticos, móveis, etc.) e imobiliária. Esta última apresenta-se em maior

quantidade no mercado, chegando a ser 75,2% do volume total de tintas produzido no Brasil, ainda segundo a Abrafati (2022).

2.1.2 Tecnologias aplicadas às tintas

As tecnologias de revestimento são fundamentais em diversas áreas, desde a preservação de alimentos até a construção civil, para proteger, aprimorar e conferir funcionalidades às superfícies dos objetos ou materiais. Revestimentos podem oferecer propriedades adicionais, como capacidades antimicrobianas e hidrofóbicas, aplicáveis em uma ampla gama de produtos e setores. Essas características ajudam na prevenção de problemas como corrosão, incrustações e degradação, resultando em maior estabilidade e durabilidade, classificando-os como produtos inteligentes ou funcionais (Parasuraman *et al.*, 2024).

A nanotecnologia tem impulsionado a inovação no campo dos revestimentos, especialmente na construção civil, onde as tintas desempenham um papel crucial ao proteger os substratos e conferir estética visual (Souto *et al.*, 2020). A incorporação de nanopartículas em tintas é teorizada como capaz de gerar melhorias substanciais em várias propriedades, incluindo resistência à água e sujeira, foto e arranhões, propriedades bactericidas, facilidade de limpeza ou capacidade autolimpante, proteção contra radiação UV e isolamento térmico.

Tais características adicionais apresentam um potencial significativo para aprimorar o desempenho e a longevidade das tintas utilizadas em uma variedade de ambientes, desde hospitais e escolas até interiores residenciais (West *et al.*, 2016). A busca por inovação na indústria química tem resultado em tintas mais sustentáveis, com técnicas de fabricação inovadoras e redução do impacto ambiental. No entanto, a biodegradação das tintas à base de água ainda representa um desafio, devido à presença de H₂O e materiais orgânicos que servem de substrato para microrganismos (Mardones *et al.*, 2019).

A indústria de tintas está adotando uma abordagem nova ao desenvolver formulações com biocidas degradáveis, que possuem baixa solubilidade em água e são liberados em quantidades mínimas, por exemplo. Isso garante uma proteção duradoura contra a colonização microbiana, enquanto os biocidas incorporados na tinta mantêm sua eficácia. Após a liberação, esses biocidas se degradam rapidamente, evitando o acúmulo no meio ambiente. Os requisitos para essas tintas

são rigorosos, exigindo que os biocidas mantenham sua atividade por longos períodos e que sejam liberados de forma controlada, sem comprometer as propriedades químicas e físicas da tinta ao longo do tempo (Kaiser *et al.*, 2013).

Além dos biocidas degradáveis, a indústria de tintas está explorando o uso de nanomateriais como uma alternativa promissora. Nanopartículas metálicas, dióxido de nanotitânio fotoativo e dióxido de nanossilica podem melhorar significativamente as características das tintas, tais como repelência à água, resistência a riscos, durabilidade e propriedades antimicrobianas. Segundo Kaiser *et al.* (2013), comparadas aos biocidas solúveis em água, as nanopartículas oferecem a vantagem de serem mais eficazmente fixadas na matriz do revestimento, reduzindo a lixiviação e, conseqüentemente, os riscos ecológicos. A expectativa é que a utilização de nanomateriais aumente significativamente na indústria de tintas, potencialmente tornando-a um dos maiores consumidores desses materiais num futuro próximo.

2.2 Tecnologia dos materiais

2.2.1 Materiais inteligentes

Os materiais inteligentes representam uma classe de aparatos que podem sentir e responder aos estímulos emanados do ambiente, adaptando-se às mudanças nas condições ambientais vigentes (Sommese; Badarnah; Ausiello, 2023). Com o desenvolvimento da tecnologia, é de grande importância que os materiais se adaptem às condições onde estão inseridos e aprimorem sua capacidade de responder adequadamente a essas condições. Materiais avançados são geralmente desenvolvidos ou projetados para ter alto desempenho, levando em consideração tarefas muito específicas.

As exigências do presente e do futuro, apontam para materiais que sejam eficientes, aplicáveis em múltiplos campos, tenham baixa energia incorporada e que possam provar-se rentáveis e amigos do ambiente. Os materiais tradicionais estão falhando em um ou outro requisito, portanto, tornou-se imperativo a busca por novos elementos para serem usados na construção civil (Mukerjee *et al.*, 2021).

Já os insumos avançados superam os tradicionais em propriedades superiores, como tenacidade, dureza, durabilidade e flexibilidade. Esse aumento de desempenho é especialmente relevante para as indústrias da aviação, automotiva,

alimentícia, biomédica, de engenharia civil, da arquitetura, entre outras, que impulsionam a demanda global por materiais avançados (Yildirim; Candan, 2023).

Em uma sociedade cada vez mais evoluída e exigente, os materiais inteligentes, também conhecidos como materiais responsivos a estímulos, surgiram como uma nova classe de materiais com amplas áreas de aplicação devido às suas propriedades únicas e sua natureza adaptável. Esses materiais avançados são projetados para imitar o comportamento biológico, respondendo a estímulos externos de maneira semelhante aos sistemas biológicos. Eles reagem a fatores como temperatura, umidade, pressão, pH e campos elétricos e magnéticos (Candan *et al.*, 2022) A produção desses materiais oferece vantagens significativas, como aumento da robustez, prolongamento da vida útil e redução dos custos de reparo.

Como exemplo, esses materiais inteligentes desempenham significativas alterações de funcionamento, propiciando o desenvolvimento de edifícios que minimizem os impactos ambientais e possam mitigar os agravos relacionados à poluição das cidades, às contaminações biológicas e também podem ser utilizados individualmente, bem como ser incorporados a materiais existentes para aprimorar suas propriedades desejáveis.

Existem vários compostos inteligentes, ou multifuncionais, que podem mudar suas propriedades e comportamento, e estão mudando o aspecto dos materiais de engenharia tradicionais. O grupo das tintas de revestimento é um deles.

2.2.2 Revestimentos funcionais

O termo 'revestimentos funcionais' refere-se a sistemas que, além de apresentarem as propriedades clássicas de um revestimento, como decoração e proteção, possuem uma funcionalidade adicional. A investigação e desenvolvimento dessas tecnologias envolve principalmente o aprimoramento dos materiais de revestimento e dos métodos de deposição, conforme as diferentes aplicações pretendidas. Os materiais utilizados para revestimentos funcionais variam desde polímeros orgânicos até compósitos híbridos e nanopartículas inorgânicas, de acordo com suas propriedades específicas e funcionalidades (Zhu *et al.*, 2022).

De acordo com Jessica *et al.*, (2020), agentes de resistência a arranhões, absorvedores de UV, pigmentos e purificadores de ar, além de biocidas são as quatro principais necessidades do mercado em aditivos de nanopartículas em

formulações de revestimentos. Dessa concepção emergem duas principais categorias de revestimentos: orgânicos e inorgânicos.

Os revestimentos orgânicos são geralmente aplicados para fins decorativos, ou para conferir funcionalidades específicas, enquanto os inorgânicos são predominantemente utilizados para proteção. Além disso, há revestimentos que combinam as características de ambas as categorias, conhecidos como camadas híbridas, onde coexistem materiais orgânicos e inorgânicos (Wicks Jr. *et al.*, 2007).

Essas camadas híbridas representam uma área promissora no campo dos revestimentos funcionais, pois permitem a combinação de propriedades desejáveis de diferentes tipos de materiais, resultando em revestimentos com desempenho superior e multifuncionalidades. As contínuas pesquisas e inovação nesse setor são cruciais para o desenvolvimento de novas soluções que atendam às demandas crescentes de diversas indústrias, desde a construção civil até a eletrônica ou a biomedicina.

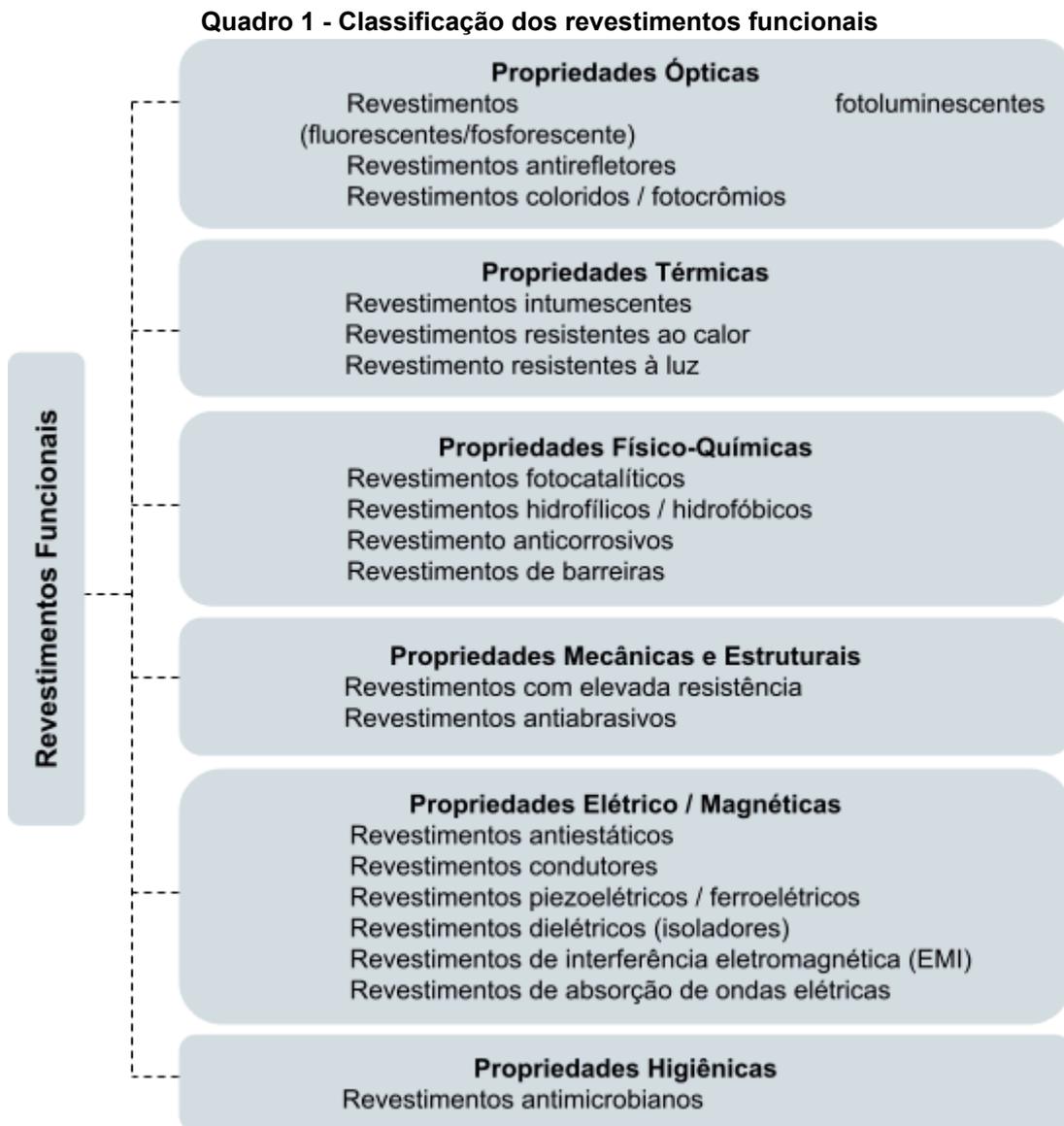
Alguns exemplos das funcionalidades apresentadas por este tipo de revestimentos referem-se a propriedades ópticas, térmicas, higiênicas, físico-químicas, elétricas e magnéticas, como mostrado no **Quadro 1**, mais adiante. Os revestimentos funcionais ativados quimicamente desempenham sua atividade na interface do filme com a superfície onde estão aplicados (revestimento anticorrosivo), no interior do filme (retardador de chama ou intumescente) ou na interface do filme com o meio envolvente (antibacteriano) (Ghosh, 2006).

O relatório 'Mercado Global de Revestimentos Nanoestruturados, Filmes e Superfícies 2021 a 2031', da Research and Markets, divulgado em 2021, lista alguns dos principais nanorevestimentos cobertos:

- Revestimentos, Filmes e Superfícies Nanoestruturados Anti-impressão Digital;
- Revestimentos, Filmes e Superfícies Nanoestruturados Antimicrobianos e Antivirais;
- Revestimentos, Filmes e Superfícies Nanoestruturados Anticorrosivos;
- Revestimentos, Filmes e Superfícies Nanoestruturados Resistentes à Abrasão e ao Desgaste;

- Revestimentos, Filmes e Superfícies Nanoestruturados Anti-incrustantes e de Fácil Limpeza;
- Revestimentos, Filmes e Superfícies Nanoestruturados Autolimpantes;
- Revestimentos, Filmes e Superfícies Nanoestruturados Fotocatalíticos;
- Revestimentos, Filmes e Superfícies Nanoestruturados Resistentes aos UV;
- Revestimentos Nanoestruturados, Filmes e Superfícies de Barreira Térmica;
- Revestimentos Nanoestruturados, Filmes e Superfícies Retardantes de Chama;
- Revestimentos Nanoestruturados, Filmes e Superfícies Anti-Gelo e Degelo;
- Revestimentos, Filmes e Superfícies Nanoestruturados Antirreflexos;
- Revestimentos Nanoestruturados, Filmes e Superfícies Auto Recuperáveis;
- Revestimentos Nanoestruturados, Filmes e Superfícies Memória de Forma;

De forma específica, o grupo que esta pesquisa atende é o de Revestimentos Antimicrobianos.



Fonte: Adaptado de Ghosh (2006).

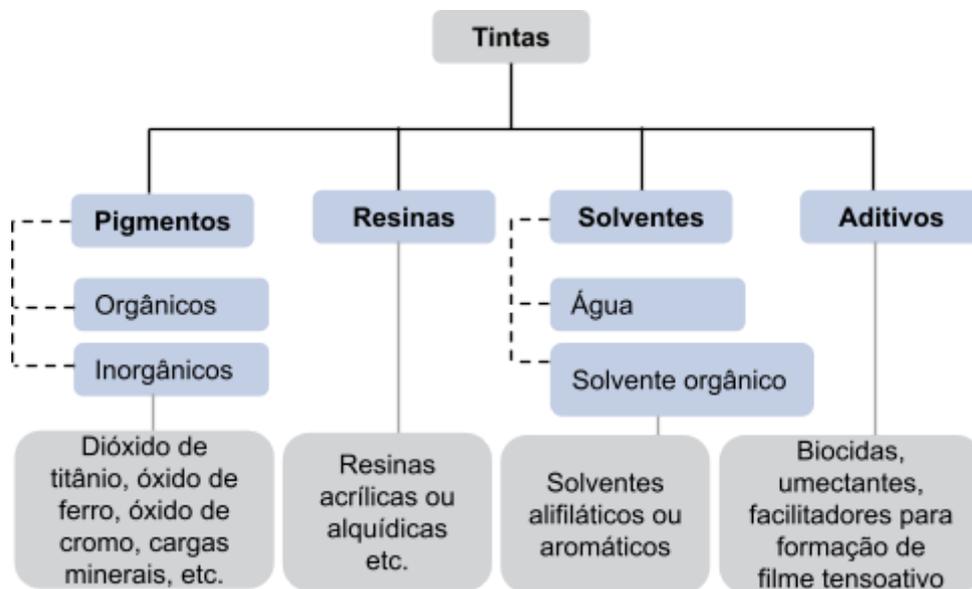
2.3 Composição das tintas

A indústria de tintas para revestimentos utiliza uma ampla variedade de matérias-primas para atender às diversas necessidades de substratos, superfícies e requisitos de desempenho (Canaude, 2022). Conforme descrito no Manual Técnico de Tintas, da Associação Brasileira dos Fabricantes de Tintas Abrafati (2020), tintas imobiliárias são utilizadas no revestimento de edificações para uso residencial,

comercial, escolar, hospitalar, dentre outros. Quanto à tipologia, tinta látex é uma composição à base de dispersão de polímeros acrílicos, vinílicos, entre outros.

As tintas são formuladas com uma fração sólida para formar a película aderente à superfície e um solvente volátil para facilitar a aplicação e secagem. Quanto à sua composição, são constituídas em base por: pigmentos, resinas, solventes e aditivos (carga) e os seus constituintes podem ser voláteis ou não voláteis (Abrafati, 2020), conforme esquema de síntese no **Quadro 2**.

Quadro 2 - Composição das tintas



Fonte: O autor (2025).

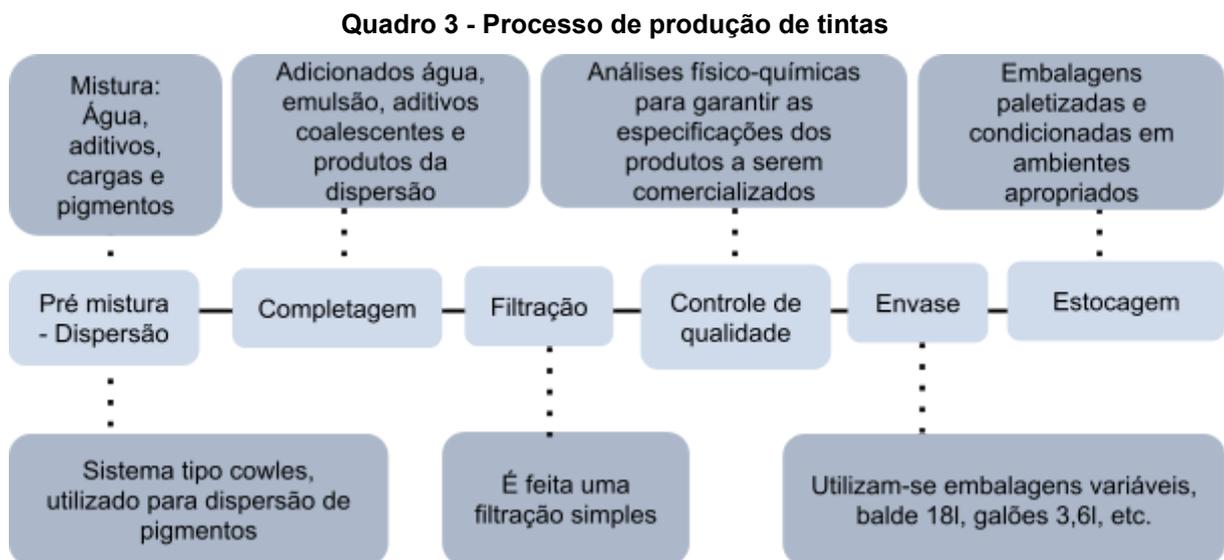
Segundo os estudos de Vaz (2017), alguns componentes, embora importantes, não são essenciais na formulação de tintas. Por exemplo, as tintas em pó, amplamente utilizadas, não contêm solventes e, portanto, não causam poluição atmosférica associada a solventes não aquosos. Elas são fornecidas prontas para aplicação, eliminando a necessidade de preparação, o que evita erros de diluição.

Tintas para interiores também dispensam muitos aditivos e resinas necessários para resistência à radiação UV. Assim, cada tinta é formulada conforme as necessidades específicas de sua aplicação, com a escolha dos componentes e suas combinações variando conforme condições ambientais, por exemplo. As propriedades finais da tinta dependem não só de sua composição, mas também do modo, quantidade e sequência de incorporação dos aditivos. Otimizando esses

fatores, é possível obter as propriedades desejadas para cada tipo de aplicação (Vaz, 2017).

A fabricação das tintas começa pela pesagem dos constituintes a serem agrupados em misturadores: pigmentos, óleos, resinas, corantes e solventes. Faz-se a seleção dos componentes das partes sólida e volátil da tinta, de acordo com as características que se deseja para o filme seco, tais como cor, brilho, espessura, dureza, flexibilidade e resistência a produtos químicos específicos. Além dessas características, é fundamental conhecer o tipo de secagem da tinta (temperatura ambiente ou aquecimento), bem como se ocorre por oxidação ou por ação de catalisadores.

Quanto aos principais elementos de composição das tintas, veremos a seguir com mais profundidade. O **Quadro 3** mostra o processo esquemático de produção de uma tinta.



Fonte: O autor (2025).

2.3.1 Resinas

As resinas (cargas) formam a película da tinta e são responsáveis pela maior parte de suas propriedades físicas e químicas, determinando brilho, resistência química e física, secagem, adesão e outras. É a parte não volátil da tinta que serve

para aglomerar as partículas de pigmentos e é responsável pela transformação do produto, do estado líquido para o sólido, convertendo-o em película. As resinas são responsáveis pelas propriedades físico-químicas da tinta, determinando, inclusive, o uso do produto e sua secagem (Canaude, 2022).

Atualmente, as resinas utilizadas na indústria imobiliária são sintéticas e formam compostos de alto peso molecular. Elas são obtidas pelo setor químico ou petroquímico, por meio de reações complexas, de polimerização, que consiste na ligação de duas ou mais unidades estruturais menores; monômeros formam uma estrutura múltipla denominado polímero e é por meio dessas características das resinas que se classificam os nomes das tintas (Fazenda, 2021).

Como exemplos das mais usuais, têm-se as tintas vinílicas, acrílicas, alquídicas, poliuretânicas, epóxi, poliéster, nitrocelulose e de borracha clorada, sendo a escolha da resina um dos principais parâmetros para uma boa especificação da tinta. Dentre as resinas, destaca-se a acrílica, devido à sua conhecida resistência às intempéries, clareza óptica, estabilidade química e boas propriedades mecânicas, tal qual a flexibilidade, conforme Nguyen *et al.* (2016) e Olad *et al.* (2016). É essa a família de resinas que será usada nos estudos desta pesquisa.

2.3.2 Solventes

Quanto ao solvente, é um líquido volátil capaz de solubilizar a resina e garantir a forma líquida da formulação, mantendo sempre o mesmo padrão de viscosidade (Amorim, 2017). São compostos (orgânico ou água) responsáveis pelo aspecto líquido da tinta com determinada viscosidade. Após a aplicação da tinta, o solvente evapora deixando uma camada de filme seco sobre o substrato. A escolha de um solvente em uma tinta deve ser feita de acordo com a solubilidade das resinas respectivas da tinta, viscosidade e forma de aplicação (Canaude, 2022).

Nas tintas à base de água, a fase volátil é representada pela água com uma pequena quantidade de líquidos orgânicos compatíveis adicionados. As vantagens de usar a água como principal solvente orgânico são suas propriedades, que, ao contrário de outros solventes, não afetam a saúde humana. Os solventes orgânicos geralmente são divididos em dois grupos: hidrocarbonetos e solventes oxigenados.

Já os hidrocarbonetos podem ser divididos também em dois tipos: alifáticos e aromáticos, enquanto os oxigenados são álcoois, acetatos, cetonas, éteres, etc.

Uma exceção importante são as tintas látex, nas quais a água é a fase dispersora e não solubilizadora de polímero responsável pelo revestimento. Atualmente, existe um esforço mundial no sentido de diminuir o uso de solventes orgânicos em tintas, com iniciativas como: substituição por água, aumento de teor de sólidos, elaboração de tintas em pó, desenvolvimento de sistema de cura por ultravioleta, entre outras (Canaude, 2022).

2.3.3 Pigmentos

Os pigmentos são substâncias sólidas, podendo ser orgânicas ou inorgânicas, utilizadas para conferir cor e cobertura aos filmes de pintura. Eles se fixam na superfície a ser colorida por meio de mecanismos de adsorção, ligações iônicas ou covalentes. Durante a aplicação, os pigmentos são espalhados no meio da tinta, formando uma dispersão relativamente estável. Esses pigmentos são, em sua maioria, substâncias sólidas cristalinas e insolúveis no meio (Fazenda, 2021).

Além disso, suas principais funções são proporcionar coloração, cobertura (opacidade) e, em alguns casos, características anticorrosivas. A capacidade dos pigmentos de encobrir os substratos, conferindo maior poder de revestimento às tintas, está diretamente relacionada a duas propriedades principais: o índice de refração e o tamanho das partículas.

Quanto aos pigmentos orgânicos, um dos aspectos mais importantes a se observar é sua durabilidade ou propriedade de permanência sem alteração da cor, principalmente para ambientes externos. São corantes insolúveis que apresentam, em sua estrutura, grupos cromóforos, ou seja, grupos funcionais caracterizados por uma ligação dupla conjugada, que são responsáveis pela coloração do material (Fazenda, 2021).

Entre os pigmentos inorgânicos estão os brancos, como o TiO_2 e o óxido de zinco (ZnO); os coloridos, como os óxidos de cromo e ferro, cromatos de chumbo e zinco, selenetos e sulfoselenetos de cádmio, entre outros; e os pigmentos extenedores, como o carbonato de cálcio e silicatos de magnésio e alumínio. Os pigmentos inorgânicos geralmente são menos brilhantes e também apresentam maior toxicidade (Matos, 2017).

Um exemplo comum em tintas é a adição de TiO_2 (anatase), uma alternativa ao pigmento rútilico, ou cristais de rutilo - mais usado devido ao brilho e ao alto índice de refração, o que confere, à tinta, maior poder de cobertura, brancura, durabilidade, estabilidade e alta densidade, e leva ao seu maior poder opacificante, bem como à maior estabilidade para pinturas nas áreas exteriores (Van Driel *et al.*, 2016) -, que pode conferir interessantes propriedades fotocatalíticas e de autolimpeza à composição da tinta.

No Brasil, a Lei Federal 11.762, de 01/08/2008, fixa o limite máximo permitido de chumbo, e de seus compostos em tintas imobiliárias e nas de uso infantil e escolar, vernizes e materiais similares de revestimento de superfícies, em 0,06% em peso, expresso como chumbo metálico, determinado em base seca ou conteúdo total não volátil (Brasil, 2008).

2.3.4 Aditivos

Aditivos são produtos químicos solúveis em resina, que são adicionados às formulações em pequenas concentrações (geralmente menos de 5%), com funções específicas de agregar propriedades importantes às respectivas tintas e revestimentos, tais como aumento da proteção anticorrosiva, bloqueadores dos raios UV, catalisadores de reações, dispersantes e umectantes de pigmentos e cargas, melhoria de nivelamento, preservantes e antiespumantes (Canaude, 2022). A seguir, no **Quadro 4**, temos a relação dos aditivos e suas funções.

Quadro 4 - Aditivos utilizados nas formulações de tinta

Aditivo	Função
Fotoindicadores	Formação de radicais livres quando submetidos à ação da radiação UV iniciando a cura das tintas de cura por UV
Secantes	Catalisadores de secagem oxidativa de resinas alquídicas e óleos vegetais polimerizados
Agentes reológicos	Modificam a reologia das tintas (aquosa e sintéticas) modificação esta necessária para se conseguir nivelamento, diminuição do escorrimento, etc.
Inibidores de corrosão	Conferem propriedades anticorrosivas ao revestimento
Dispersantes	Melhoram a dispersão dos pigmentos na tinta
Umectantes	Nos sistemas aquosos aumentam a molhabilidade de cargas e pigmentos, facilitando a sua dispersão
Bactericidas	Evitam a degradação do filme da tinta devido à ação de bactérias, fungos e algas
Coalescentes	Facilitam a formação de um filme contínuo na secagem de tintas base água unindo as partículas do látex

Fonte: Adaptado de Canaude (2022).

As cargas, às vezes chamadas de aditivos, também aparecem classificadas dentro dos pigmentos inorgânicos, são minerais industriais com características importantes de brancura e granulometria, que melhoram as propriedades de cobertura e resistência às intempéries, além de ajudar a reduzir o custo de fabricação em alguns tipos de tintas (Canaude, 2022). Os minerais mais utilizados são: carbonato de cálcio precipitado, sulfato de bário, sílica, sílico-aluminato de sódio, etc. As tintas contêm diversos compostos orgânicos que podem servir como nutrientes para o crescimento de microrganismos, por exemplo.

Nesse sentido, tratando da contaminação biológica, ela pode ocorrer tanto no filme seco quanto na tinta úmida, dependendo de fatores como incidência de luz solar, pH, tipo de nutriente, temperatura e quantidade de água disponível, variando,

inclusive, conforme o tipo de microrganismo. Tintas à base de água são particularmente suscetíveis a bactérias, fungos e algas (Matos, 2017).

Embora fungos e algas não cresçam em latas fechadas, eles podem afetar a película de tinta seca. A presença de bactérias pode comprometer as propriedades físico-químicas das tintas, causando alterações na viscosidade, mau cheiro e produção de gás (CO₂), o que pode aumentar a pressão dentro das latas e danificar a embalagem.

Por isso, agentes microbicidas, como os biocidas, são essenciais na composição das tintas, para eliminar microrganismos e conservá-la. O **Quadro 5** resume os principais constituintes da tinta, que diferem conforme as condições ambientais de aplicação.

Quadro 5 - Principais constituintes das tintas

Componentes	Definição
Resinas	Produto macromolecular, geralmente amorfo, de consistência que varia entre o estado sólido e o estado líquido.
Pigmentos	Material corante, geralmente na forma de partículas finas, que é praticamente insolúvel no meio de suspensão e que é utilizado devido às suas propriedades óticas, protetoras e/ou decorativas.
Cargas	Material sob a forma de grânulos ou de pó, insolúvel no meio de suspensão e utilizada para modificar ou influenciar determinadas características físicas.
Solventes	Líquido simples ou mistura de líquidos, voláteis sob determinadas condições de secagem, e no qual o ligante é solúvel.
Aditivos	Qualquer substância adicionada em pequenas quantidades a um produto de pintura, para melhorar ou modificar uma ou mais propriedades.

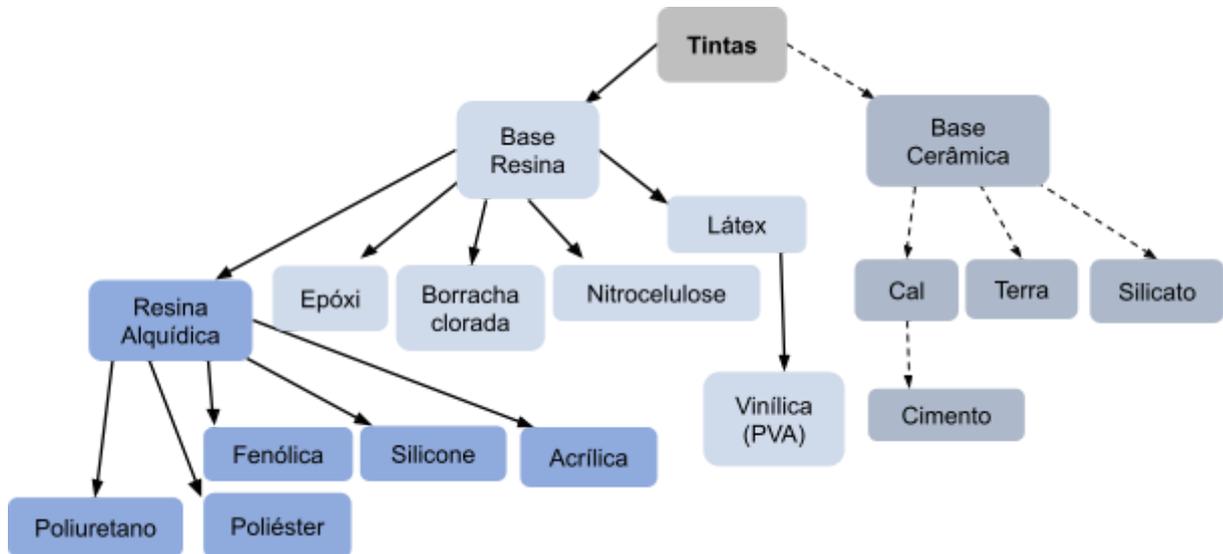
Fonte: Adaptado de Vaz (2017).

2.4 Tintas imobiliárias

No mercado, há uma ampla variedade de produtos com diferentes composições, tipos de pigmentos, aplicações e tecnologias, utilizados em diversos setores da economia, tal qual o têxtil, gráfico, de tintas para impressão e pinturas em tela, entre outros. O foco deste estudo está nas tintas do segmento da construção

civil, conhecidas como tintas imobiliárias (Anghinetti, 2012). O **Quadro 6** apresenta os tipos mais usados no ramo em análise, conforme suas bases.

Quadro 6 - Classificação das tintas imobiliárias



Fonte: Adaptado de Anghinetti (2012).

As tintas imobiliárias podem ser divididas em dois tipos principais, sendo aquelas à base de resina ou cerâmica. As que têm base de resina formam um filme plastificado sobre o substrato, bloqueando a troca de gases com o ambiente externo. Porém, uma exceção é a tinta à base de silicone, que interage com o substrato, permitindo a troca de gases e vapor d'água. Além disso, por outro lado, as tintas à base de cerâmica, como aquelas feitas de cal, cimento, terra e silicatos, permitem que o substrato "respire", ou seja, não bloqueiam a troca de gases e não formam um filme plastificado. Outra diferença importante é que as tintas cerâmicas são menos prejudiciais ao meio ambiente, tanto em sua produção quanto em seu uso e descarte.

De acordo com o mercado e as tecnologias predominantes, as tintas podem ser classificadas em dois grandes grupos (Canaude, 2021), o das tintas à base de óleo ou solventes, incluindo-se esmaltes sintéticos, vernizes e lacas. Nesses produtos, a fase volátil, ou seja, o líquido responsável pela evaporação é formado por solventes orgânicos, como hidrocarbonetos alifáticos, aromáticos e compostos oxigenados; as tintas à base de água, são conhecidas como tintas látex e incluem

látex acrílico, vinílico e vinil-acrílico. Nesse tipo de tinta, a fase volátil é a água, e esse é o foco principal do presente estudo.

A principal diferença entre esses dois grupos está no veículo ou componente líquido da tinta. No caso das tintas à base de óleo, são utilizados solventes orgânicos, enquanto as tintas à base de água utilizam a água como componente principal na fase volátil. Aqui, focamos especificamente nas tintas à base de água, amplamente empregadas na construção civil, devido à sua praticidade, menor impacto ambiental e versatilidade.

2.4.1 Tintas de base aquosa

Apesar da diversidade de empresas e marcas de tintas, os principais parâmetros utilizados para avaliar a qualidade das tintas acrílicas e classificá-las em termos de desempenho são cobertura, lavabilidade e rendimento. Com o aumento das exigências normativas de eficiência nas construções e materiais, como estabelecido pela NBR 15575/2020 no setor da construção civil, há uma pressão crescente para que as construtoras garantam um desempenho mínimo em suas edificações, o que está promovendo mudanças significativas no mercado.

Em setembro de 2019, no Brasil, a norma ABNT NBR 15079 foi atualizada. Originalmente, ela abordava apenas tintas látex com níveis de desempenho Econômico, Standard e Premium com acabamento fosco. Agora, na nova versão, incluiu-se um novo nível de desempenho, denominado 'Super Premium', e uma segunda parte para cobrir tintas Standard, Premium e Super Premium com acabamentos acetinado, semiacetinado e semibrilho (Abrafati, 2020).

Um dos aspectos considerados pelas normas é o tempo que as fachadas das edificações devem permanecer com um aspecto limpo, o que contribui para a redução dos custos de limpeza, consumo de energia na manutenção e repintura das fachadas. Em sistemas à base de água, a parte líquida é predominantemente composta por água. Um exemplo notável são as tintas literalmente à base de água e seus aditivos usados na construção civil, que representam 80% das tintas utilizadas nesse segmento (Canaude, 2022).

A indústria de tintas é segmentada em três principais categorias de mercado. A maior demanda provém dos revestimentos decorativos, destinados a superfícies

internas e externas de edifícios comerciais, industriais, institucionais e residenciais. A segunda categoria inclui os revestimentos industriais, aplicados em produtos como eletrodomésticos, móveis, transporte e mercadorias. Já a terceira abrange os revestimentos especiais, desenvolvidos para resistir a condições extremas, conforme as necessidades específicas do cliente (Chen *et al.*, 2022).

De acordo com Chen *et al.* (2022), em resposta à crescente preocupação ambiental, tem ocorrido uma mudança significativa na preferência por revestimentos à base de água, com alto teor de sólidos, em pó e curáveis por radiação, em detrimento dos revestimentos à base de solventes, visando à redução das emissões de compostos orgânicos voláteis (COVs). Entre essas alternativas, os revestimentos à base de água têm ganhado maior aceitação devido a características como menor odor, baixos níveis de COV, viscosidade reduzida e facilidade de aplicação.

Ressaltamos que, desde o início da pandemia de covid-19, em 2020, tem havido um aumento no interesse por tintas antivirais, abrindo novas oportunidades de mercado. A pandemia impactou significativamente a vida das pessoas e a economia global. Segundo Chen *et al.*, (2022), para atender às novas demandas dos consumidores, os fabricantes têm desenvolvido uma ampla gama de produtos funcionais, incluindo tintas resistentes a intempéries, ecológicas, com propriedades de proteção térmica, inodoras, antibacterianas e antiincrustantes, especialmente para embarcações marítimas.

Vale ressaltar, por exemplo, um estudo sobre o mercado consumidor de tintas na Índia, que mostrou que a qualidade e a durabilidade do produto são os principais critérios considerados pelos consumidores ao adquirirem tintas decorativas (Dash, 2016). Como as tintas à base de água são sensíveis à umidade e ao ataque microbiano, biocidas são utilizados para prevenir a biodeterioração estética.

Para superar as limitações dos revestimentos à base de água em comparação com os à base de solventes, promovem-se avanços na adição de resinas, como o látex protetor corrosivo à base de acrílico e o látex de copolímero uretano-acrílico, que oferecem maior resistência química (Chen *et al.*, 2022). A importância do tipo de resina é tamanha que as tintas são nomeadas de acordo com a resina utilizada. Por exemplo, a tinta alquídica é composta por resina alquídica, enquanto a tinta acrílica é composta por resina acrílica.

Os produtos conhecidos como látex são baseados em dispersões aquosas (emulsões) de polímeros, tal qual vinil - também conhecido como acetato de polivinil (PVA) -, vinil acrílico, acrílico e estireno-acrílico (Fazenda, 2021). As resinas acrílicas, obtidas pela polimerização de monômeros acrílicos como o metacrilato de metila e o acrilato de butila, podem ser dissolvidas em solventes orgânicos ou em água (Anghinetti, 2012).

A durabilidade da película sólida formada após a secagem da tinta não depende apenas das condições de aplicação, mas também da degradação que a tinta pode sofrer antes de ser aplicada ao substrato. Embora pequenas quantidades de bactérias estejam sempre presentes nas tintas, elas geralmente não causam problemas de degradação naquelas à base de solvente. No entanto, nas à base de água, bactérias e fungos encontram condições ideais para reprodução, o que leva a um crescimento exponencial (Vaz, 2017).

Esse desenvolvimento microbiano pode resultar em alterações de viscosidade, pH, mau odor, descoloração, formação de biofilmes e produção enzimática, o que leva à quebra dos polímeros em monômeros, acelerando a degradação da tinta. Se a deterioração microbiana for significativa, a aplicação pode resultar em má adesão ao substrato, provocando falhas que expõem o substrato ao ambiente. Para evitar esses problemas, substâncias aditivas são regularmente utilizadas para proteger o revestimento final, desde a produção da tinta até sua aplicação e secagem.

Os biocidas são um exemplo dessas substâncias, sendo adicionados às tintas sob a forma de inseticidas, bactericidas, fungicidas e algicidas. Nesta pesquisa, por conseguinte, as tintas à base de água acrílica com acabamento fosco na cor branca foram escolhidas para os estudos de laboratório.

2.5 Aditivos antimicrobianos em tintas

Aditivos antimicrobianos são substâncias incorporadas durante a fabricação de produtos, para resistir, inibir e prevenir o crescimento de micróbios, como bactérias e mofo. Eles tornam os produtos mais higiênicos, reduzindo a contaminação cruzada e estendendo a vida útil do material (Reiss *et al.*, 2021). Segundo o Decreto-Lei nº 112/2010, produtos biocidas são substâncias ou preparações que contêm uma ou mais substâncias ativas destinadas a destruir, inibir

ou controlar organismos prejudiciais por mecanismos químicos ou biológicos (Brasil, 2010).

No Brasil, seguindo os modelos de regulamentação para o fabricação e venda de produtos com biocidas, no caso das tintas, a ANVISA, por meio do seu Relatório de Mapeamento de Impactos (REMAI), estabelece que, quanto à situação internacional, as tintas ou aditivos de tintas para parede com ação inseticida ou repelente são registrados na Environmental Protection Agency (EPA) como pesticidas (Sunset Camo Face Paint with insect repellent®, Bug-Juice insecticide paint additive®), assim como existe registro similar também na Espanha (Inesfly®). Países que emitem autorização de comercialização são: Portugal, Itália, Luxemburgo, Bélgica, França e outros (Anvisa, 2019).

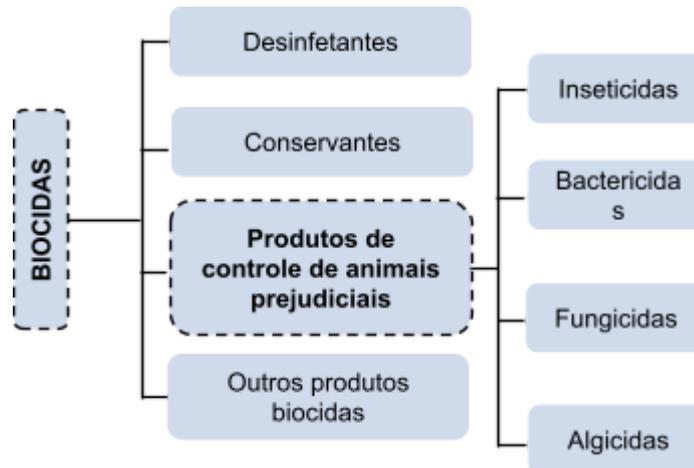
A adição de agentes antifúngicos e/ou antimicrobianos, conhecidos como biocidas, em tintas, é uma prática comum na indústria, para inibir o crescimento de microrganismos na superfície das películas de tinta (Contant *et al.*, 2010). Ainda segundo o relatório da ANVISA, no caso das tintas, a EPA mantém essas determinações, classificando-as segundo propriedade antimicrobiana (bactérias, fungos, insetos, etc), com alegação de ação 'bactericida', 'germicida', 'antibacteriana', 'esterilizante', 'desinfetante', 'virucida', 'repelente', 'inseticida', etc. Registradas no Brasil, precisam de autorização para darem entrada no mercado consumidor.

Como é comum a adição de diversos biocidas para proteger os produtos contra ataques microbianos, e para prevenir o crescimento de microrganismos (bactérias, fungos e algas) na formulação de tintas, categorizam-se os subtipos como se observa no **Quadro 7**.

- Pesticida: agem no controle de pragas, principalmente no setor agrícola;
- Bactericidas: agem sobre as bactérias desenvolvidas no estado líquido da tinta ou na superfície da tinta já seca;
- Fungicidas: agem sobre os fungos que normalmente se desenvolvem no filme de tinta já curado;
- Algicidas: agem sobre as algas que se desenvolvem na superfície da tinta já seca, normalmente em ambientes externos.

Os biocidas de acordo com European Chemicals Agency (ECHA) (Echa, 2012), dividem-se em 4 grupos: Desinfetantes, Conservantes, Produtos de Controle de Animais Prejudiciais e Outros Produtos Biocidas.

Quadro 7 - Classificação dos biocidas



Fonte: Adaptado de Echa (2017).

Devido às suas características intrínsecas, os biocidas podem atacar não apenas os organismos-alvo, mas também outros que se pretende preservar. Esse comportamento pouco seletivo faz com que, quando em contato com organismos animais (especialmente humanos) ou vegetais, os biocidas possam danificar suas células, especialmente em grandes quantidades, provocando eczemas, irritações cutâneas ou até mesmo a morte (Vaz, 2017).

Portanto, esses componentes representam potencial ameaça ao ecossistema quando usados em quantidades excessivas e sem controle. Diante dos riscos inerentes à produção e manuseio de biocidas, é crucial estabelecer um equilíbrio entre sua utilização e os efeitos adversos que podem causar à saúde humana e ao ecossistema.

Os biocidas mais comuns, como Isotiazolinona, Piretróides, Carbamatos, Formaldeído e derivados de Triazina, são monitorados devido à sua toxicidade e baixa eficiência de redefinição na superfície do revestimento (Vaz, 2017; Huang *et al.*, 2018; Pereyra *et al.*, 2014). No entanto, a lixiviação desses biocidas pode causar problemas ambientais e riscos à saúde humana (Bellotti *et al.*, 2015). Para contornar esses problemas, materiais porosos e nanoparticulados estão sendo utilizados para

encapsular e estabilizar biocidas, aumentando sua eficácia (Shchukina; Shchukin; Grigoriev, 2018).

Quanto ao uso e especificação, as tintas funcionais antimicrobianas são amplamente utilizadas na indústria imobiliária para ambientes que necessitem de proteção contra microrganismos patogênicos. Essenciais para o controle da propagação de infecções, esses revestimentos são especialmente demandados em centros de saúde e locais públicos, onde reduzem significativamente a transmissão de infecções (Antunes, 2013).

Em relação à toxicidade, as nanopartículas inorgânicas, como prata e cobre, melhoram a resistência ao desgaste e as propriedades antibacterianas dos revestimentos. A prata, em particular, é eficaz na prevenção de ataques de fungos e bactérias com baixa toxicidade (Macmullen *et al.*, 2014). A nanotecnologia oferece uma vasta gama de compostos antimicrobianos para diversas aplicações, sendo o dióxido de titânio (TiO₂), o óxido de zinco (ZnO) e a prata (Ag⁺) os mais estudados e utilizados em revestimentos poliméricos (Shirkavand *et al.*, 2015).

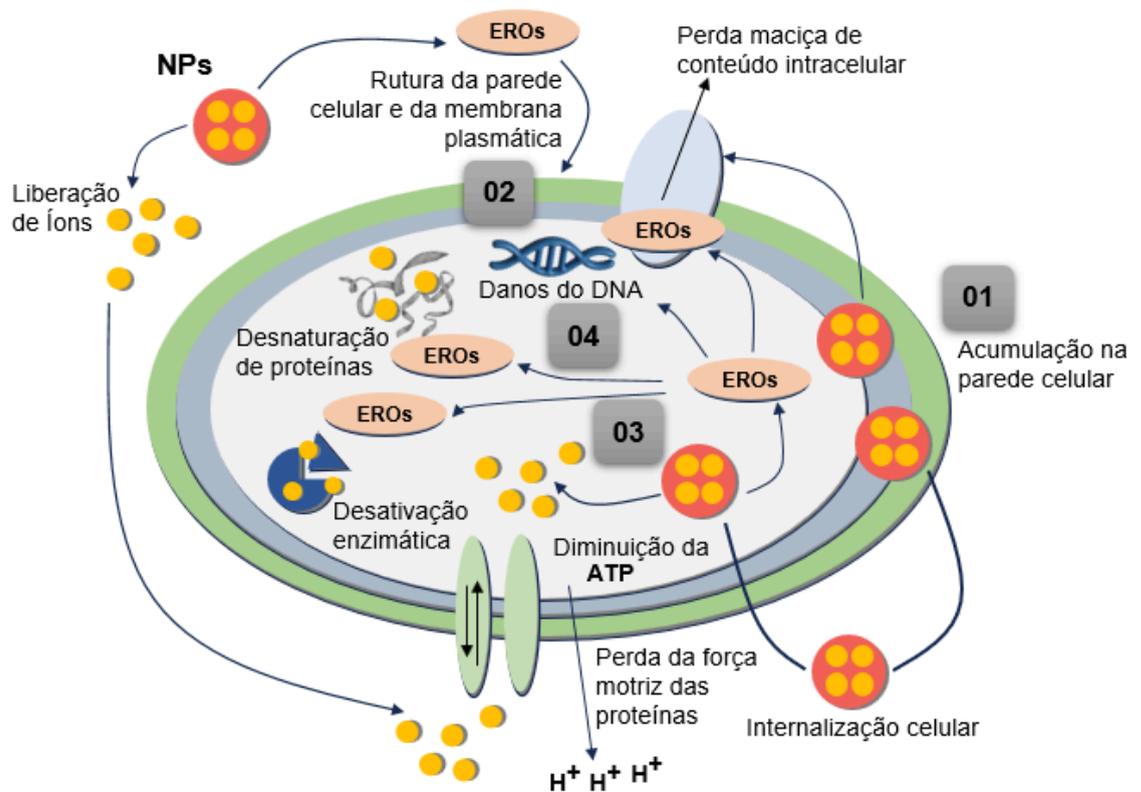
Ademais, nanopartículas de prata (AgNP's) têm mostrado alta capacidade bactericida, devido à sua elevada relação entre a área superficial e o volume das partículas. Essas partículas são utilizadas em vários âmbitos, incluindo cosméticos, produtos de consumo doméstico e materiais de construção, a fim de reduzir a propagação de organismos (Maillard; Hartemann, 2013). Além disso, as AgNP's possuem boa condutividade, efeito catalítico, baixa toxicidade e excelente atividade antimicrobiana de amplo espectro, sem induzir resistência (Galdiero *et al.*, 2011; Soares, 2014).

As mencionadas NPs são quimicamente resistentes e mantêm suas propriedades mecânicas após longos períodos, mesmo com limpeza frequente. Um estudo no Reino Unido mostrou que superfícies tratadas com AgNP's podem reduzir a contaminação bacteriana em até 95,8% (Ortí-Lucas; Muñoz-Miguel, 2017). A seleção de materiais é crucial na formulação de revestimentos antimicrobianos, e os nanomateriais têm se destacado como aditivos bioativos promissores (Bellotti *et al.*, 2015).

Fungos como *Aspergillus*, *Cladosporium* e *Penicillium*, e bactérias como *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli*, bem como microalgas de água doce e marinha, são responsáveis pela deterioração das películas de tinta (Bensch *et al.*,

2018; Bi *et al.*, 2019; Eyssautier-Chuine *et al.*, 2018). Os materiais de NPs inorgânicas, como metais e óxidos metálicos, podem induzir a morte celular, detalhado na **Figura 1**, mostrando diferentes ações sobre as células das bactérias, criando aberturas na membrana celular e penetrando no citoplasma bacteriano (Dias *et al.*, 2021).

Figura 1 - Diferentes mecanismos de ação dos íons de prata nas bactérias



Fonte: Adaptado de Chen (2022).

Quanto ao mecanismo de ação das nanopartículas inorgânicas, como as de prata, por exemplo, para combater bactérias, pode-se variar de acordo com o sistema. Atualmente, quatro ações antimicrobianas são conhecidas (Salleh *et al.*, 2020).

1. Adesão à superfície: uma vez em contato com o microrganismo, a nanopartícula adere à parede celular, ou membrana plástica bacteriana, em função de atrações eletrostáticas. Os íons positivos de prata são atraídos para a superfície negativa da bactéria. Como consequência dessa adesão, o envoltório bacteriano sofre mudanças morfológicas irreversíveis, alterando a integridade da bicamada lipídica e

sua permeabilidade. Tais alterações afetam a capacidade da célula de regular suas funções, podendo levar à morte celular.

2. Penetração nas células: como a nanop prata possui afinidade com o envoltório bacteriano, para alguns microrganismos ela tem a capacidade de penetrar a membrana. Dentro da célula, as nanopartículas de prata interagem com diferentes biomoléculas danificando a estrutura interna da bactéria. No caso das proteínas, por exemplo, os íons prata podem provocar a desnaturação, enquanto que, no DNA, podem atuar diminuindo a estabilidade da estrutura por repulsões eletrostáticas.

3. Estresse oxidativo: um dos mecanismos mais difundidos de ação da nanop prata está vinculado à sua capacidade de produzir espécies reativas de oxigênio (EROs), também conhecido como “reactive oxygen species” (ROS). Tais moléculas, como superóxidos, óxidos e radicais livres, são altamente instáveis, e reagem com facilidade com as estruturas bacterianas e demais biomoléculas. Nesse cenário, EROs promovem o estresse oxidativo, podendo levar à apoptose celular.

4. Interrompe as vias de transdução: em algumas bactérias, a nanop prata pode atuar como modulador de transdução de sinal. Ou seja, gerar interferências significativas na comunicação celular. Nesse cenário, estudos mostram que as nanopartículas podem causar alterações morfológicas no citoesqueleto de actina, levando ao aumento da fluidez da membrana e, eventualmente, a uma ruptura.

Em seu trabalho de revisão sobre ‘Dióxido de titânio e outros aditivos antimicrobianos à base de nanomateriais em tintas e revestimentos funcionais’, Chen (2022) apresenta resumos sobre as atividades de tintas antibacterianas, fungicidas e virais. No **Quadro 8**, podemos notar os principais aditivos observados em seus estudos com ação antibacteriana, aplicados em tintas acrílicas de base aquosa.

Quadro 8 - Resumo das atividades de tintas antibacterianas

Aditivo	Ação sobre microrganismos	Aplicação como aditivo em tinta	Referência
Ag	Escherichia coli Staphylococcus aureus Klebsiella granulomatis Pseudomonas aeruginosa Salmonella enterica	Tinta acrílica branca aquosa	(Holtz <i>et al.</i> , 2012; Kumar <i>et al.</i> , 2008; Lateef <i>et al.</i> , 2016).
ZnO-Ag	Listeria monocytogenes, Pseudomonas aeruginosa Salmonella senftenberg	Tinta acrílica branca aquosa	(Tornero <i>et al.</i> , 2018).
ZnO	Escherichia coli Staphylococcus aureus	Tinta acrílica branca aquosa	(Fiori <i>et al.</i> , 2017).
TiO₂	Escherichia coli Staphylococcus aureus	Tinta acrílica branca aquosa	(Caballero <i>et al.</i> , 2010; (Hwang <i>et al.</i> , 2017).
SiO₂-TiO₂	Escherichia coli	Resina Poliacrílica aquosa	(Verma <i>et al.</i> , 2020).
TiO₂	Bacillus mycoides	Primer aquoso	(Kaew-On; Katemake; Prasongsuk, 2020).

Fonte: Adaptado de Chen (2022).

Nos últimos anos, diversos estudos têm abordado as notáveis propriedades antimicrobianas das nanopartículas metálicas nobres, como as de cobre (CuNP's), prata (AgNP's) e ouro (AuNP's), na supressão de bactérias Gram-positivas e Gram-negativas¹, assim como em células tumorais e fungos (Bastos *et al.*, 2022). Por outro lado, compostos de prata, tais como o molibdato de prata (Ag₂MoO₄), vanadato de prata (Ag₃VO₄), fosfato de prata (Ag₃PO₄) e tungstato de prata (Ag₂WO₄), têm sido amplamente citados em um volume significativo de estudos, devido às suas aplicações antimicrobianas, antifúngicas e antitumorais.

No mercado brasileiro, muitas empresas têm investido em apresentar produtos com capacidade fungicida e bactericida. No **Quadro 9**, são apresentadas as principais marcas de tintas com aditivos funcionais, que atuam de forma a prevenir e/ou eliminar bactérias, fungos e vírus. De forma geral, o Píritonato de Zinco é o agente biocida predominante nas marcas nacionais, evidenciando seu reconhecimento consolidado por ter propriedades bactericidas. A ampla utilização desse composto reflete a confiança da indústria em sua eficácia no combate a

¹ São indicadores importantes de caracterização e classificação inicial de bactérias. Diz respeito a dois grupos que indicam sua coloração: as Gram-positivas apresentam-se na cor roxa e as Gram-negativas aparecem na cor vermelha (BRASIL, 2021).

microrganismos patogênicos, sendo um indicativo de sua importância na formulação de produtos que requerem características antimicrobianas robustas e confiáveis.

Quadro 9 - Marcas Brasileiras de tintas antimicrobianas

Nome / Marca	Aditivo	Tipo de tinta	Ação antimicrobiana
Pró Saúde - Iquine	Isotiazolinona	Tinta acrílica	Bactérias e fungos
Clean Antibactéria- Leinertex	Piritionato de zinco	Tinta acrílica	Bactérias
Tintas hospitalar - Maza	Zinco-2-piridinetiol-1-oxid o 0,01 – 1,0	Tinta acrílica	Bactérias e fungos
Total Protect - Maza	Isotiazolinona 0.10 - 0,30	Tinta acrílica	Fungos e mofos
Metalatex Bioprotect – Sherwin Williams	Piritionato de zinco	Tinta acrílica	Bactérias, fungos e mofos
Total Care– Sherwin Williams	Piritionato de zinco	Tinta epóxi aquosa	Mofos
Família protegida - Suvinil	Sal de piritionato de zinco	Tinta acrílica	Bactérias, fungos e mofos

Fonte: O autor (2025).

2.6 Tungstato de prata

2.6.1 Caracterização e estrutura

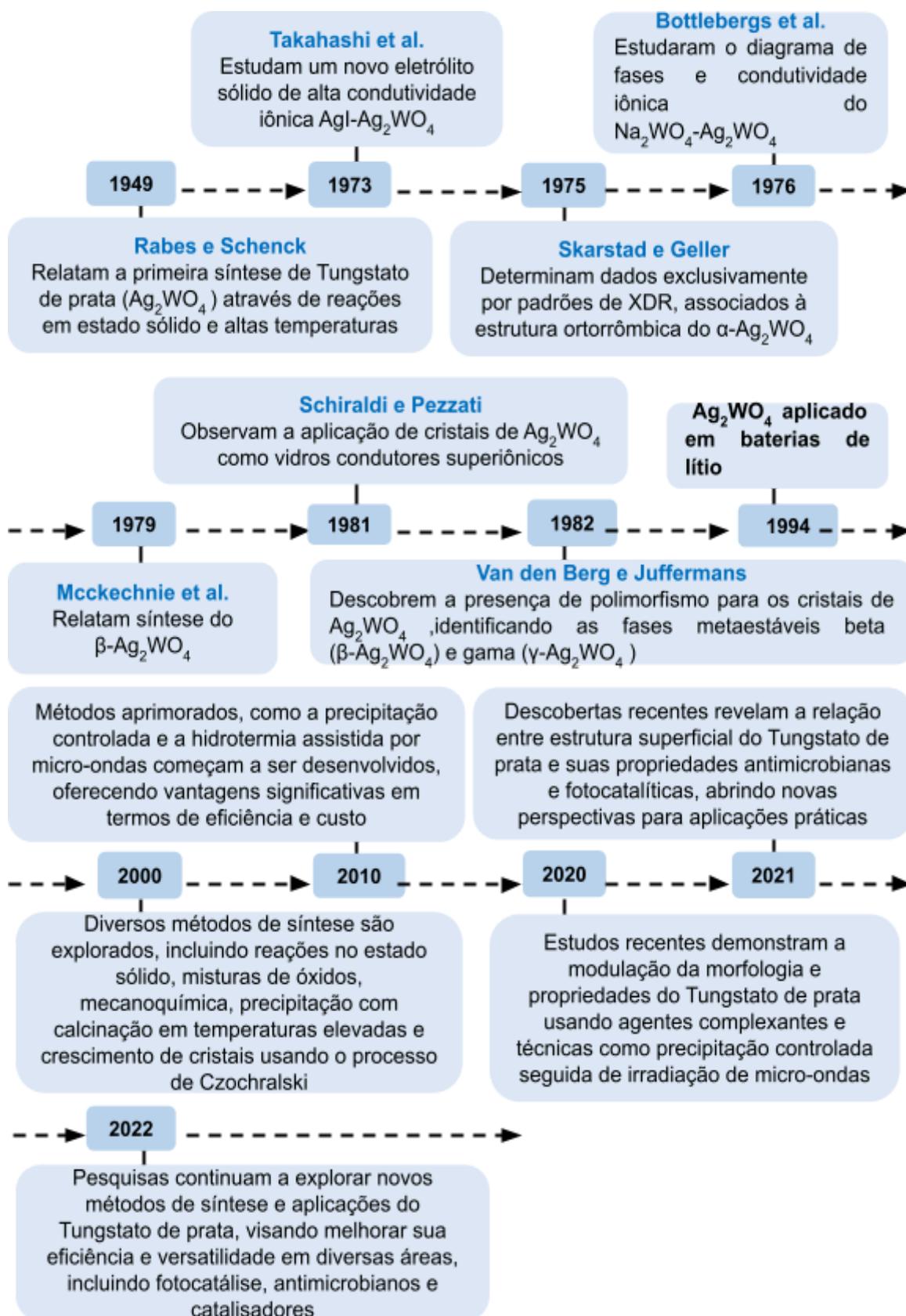
A família dos tungstatos metálicos tem sido amplamente estudada. Um de seus membros representativos é o tungstato de prata (Ag_2WO_4), que faz parte de uma subfamília de compostos inorgânicos particularmente pesquisada, devido a estruturas cristalinas e eletrônicas específicas (Andrés *et al.*, 2014), e que oferece grande variabilidade estrutural; conseqüentemente, ampla aplicabilidade técnica (Gouveia *et al.*, 2022). Conforme as pesquisas de Bastos (2022), é considerável o número de publicações que descrevem as aplicações tecnológicas e biomédicas dos polimorfos de tungstato de prata, e que sugerem a sua utilização em uma variedade de contextos, entre elas as excelentes propriedades catalíticas, ópticas, semicondutoras e antimicrobianas.

Os primeiros estudos com Ag_2WO_4 remontam a década de 1940, e sua evolução em pesquisas é apresentada por meio de uma linha do tempo, como demonstrado adiante, no **Quadro 10**. Os estudos sobre o Ag_2WO_4 começaram em 1949, quando Rabes *et al.* (1949) relataram a síntese do composto através de experimentos de estado sólido em altas temperaturas. Eles descobriram que a prata metálica (Ag^0) é oxidada a íon de prata (Ag^+), e reage com óxido de tungstênio

(WO₃) para formar Ag₂WO₄ e W₃O₈. Esse foi um marco importante, pois estabeleceu as bases para futuras pesquisas sobre o material.

Em 1973, Takahashi, Ikeda e Yamamoto estudaram um novo eletrólito sólido de alta condutividade iônica, o AgI-Ag₂WO₄, à temperatura ambiente (Takahashi; Ikeda; Yamamoto, 1973). Dois anos depois, Skarstad e Geller determinaram a estrutura ortorrômbica do Ag₂WO₄, através de padrões de difração de raios X (XRD) (Takahashi; Ikeda; Yamamoto, 1973). Já em 1976, Bottelberghs; Everts; Broers investigaram o diagrama de fases e a condutividade iônica do sistema Na₂WO₄-Ag₂WO₄, além de explorar a capacidade térmica e cinética de reação do Ag₂WO₄ com brometo e cloreto de mercúrio. O avanço nas pesquisas continuou e, em 1979, Mckechnie *et al.* (1979) relataram a síntese da fase β-Ag₂WO₄.

Quadro 10 - Linha do tempo das pesquisas com tungstato de prata



Fonte: Adaptado de Gouveia (2022).

Em 1981, Schiraldi e Pezzati (1981) demonstraram a aplicação de cristais de Ag_2WO_4 como vidros condutores super iônicos. No ano seguinte, Van den Berg e Juffermans descobriram a existência de polimorfismo nos cristais de Ag_2WO_4 , identificando as fases metaestáveis $\beta\text{-Ag}_2\text{WO}_4$ (hexagonal) e $\gamma\text{-Ag}_2\text{WO}_4$ (cúbica). Entre 1982 e 2013, diversos métodos de preparação de Ag_2WO_4 foram desenvolvidos, incluindo reações no estado sólido, precipitação com calcinação e crescimento de cristal pelo processo de Czochralski². Contudo, esses métodos exigiam altas temperaturas e longos tempos de processamento. Recentemente, técnicas aprimoradas de síntese foram introduzidas, como precipitação controlada, métodos hidrotérmicos convencionais (CH) e assistidos por micro-ondas (MAH), permitindo a obtenção de cristais com diferentes tamanhos, formas e fases (Gouveia *et al.*, 2022).

O método CH tem sido amplamente utilizado para preparar tungstos com tamanhos e formas variados, utilizando solventes ecologicamente corretos e baixas temperaturas de processamento ($\sim 200^\circ\text{C}$). Por outro lado, o método MAH acelera a taxa de reação e promove a cristalização devido ao uso de energia de micro-ondas, oferecendo vantagens de menor consumo de energia e formas variadas de cristais, por exemplo.

Ainda segundo Gouveia *et al.* (2022), pesquisas recentes focam na estabilização de fases metaestáveis, e na obtenção de nanobastões e nanofibras de Ag_2WO_4 , através de métodos sonoquímico e reações de coprecipitação assistidas por micro-ondas. Em 2015, Ramezani *et al.* (2015) utilizaram deposição eletroquímica para preparar $\beta\text{-Ag}_2\text{WO}_4$ em diferentes morfologias nanoscópicas. Em 2016, o grupo de Gouveia *et al.* (2022) realizou estudos comparativos entre métodos sonoquímico, de coprecipitação e hidrotérmico, obtendo microcristais em forma de bastonete de oito facetas.

Em 2018, esse mesmo grupo de estudos sintetizou seletivamente as fases α -, β - e $\gamma\text{-Ag}_2\text{WO}_4$ através de rotas de precipitação simples à temperatura ambiente, controlando as proporções dos precursores em solução (Gouveia *et al.*, 2022). Finalmente, em 2021, eles conseguiram sintetizar microcristais multifacetados em forma de bastonete de $\beta\text{-Ag}_2\text{WO}_4$ utilizando uma reação simples de coprecipitação à

² É uma técnica para crescimento de cristais, utilizada principalmente para a produção de semicondutores de materiais eletrônicos e ópticos (ScienceDirect, 2005).

temperatura ambiente, marcando um avanço significativo na síntese e aplicação desse material. As diferenças nas propriedades das fases do Ag_2WO_4 são atribuídas às suas distintas morfologias e arranjos estruturais. Por isso, muitos estudos utilizam esse material, tal como fotocatalisadores, materiais antibacterianos, fotoluminescentes e sensores de gás (Vergani et al., 2021). Por conseguinte, o tungstato de prata é um óxido misto de fórmula geral A_2BO_4 , onde A é um cátion monovalente e B pode ser Mo ou W.

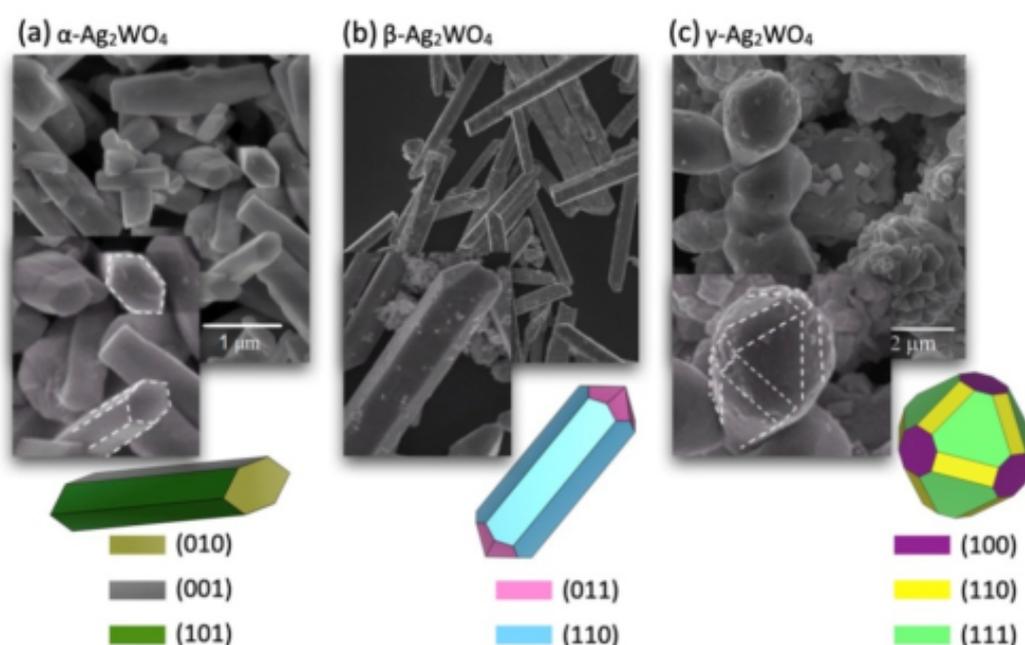
Vale ressaltar que alguns materiais sólidos podem apresentar diferentes arranjos estruturais, fenômeno conhecido como polimorfismo, que é a capacidade de um material existir em mais de uma forma, com a mesma composição química, mas com diferentes estruturas cristalinas. Diferentes polimorfos podem exibir propriedades químicas, físicas e biológicas distintas, o que pode levar a novas propriedades, bem como abrir possibilidades de aplicações em diversas áreas de pesquisa: o fotocatalisadores, sensores de gases, condutores iônicos, etc. E essa é uma característica importante do Ag_2WO_4 .

A estrutura cristalina determina as propriedades de um material e o polimorfismo pode impactar diretamente em suas propriedades funcionais e aplicações tecnológicas (Roca et al., 2017). O Ag_2WO_4 é um polimorfo e apresenta três tipos de estruturas cristalinas (Andrés et al., 2014a), resultando nos polimorfos α , β e γ - Ag_2WO_4 : estrutura ortorrômbica com grupo espacial ($\text{Pn}2\text{n}$) e grupo pontual de simetria ($\text{C}102\text{v}$), referente à fase alfa (α); estrutura hexagonal com grupo espacial ($\text{P}63/\text{m}$) e grupo pontual de simetria ($\text{C}26\text{h}$), referente à fase beta (β); e estrutura cúbica do tipo espinélio com grupo espacial ($\text{Fd}3\text{m}$) e grupo pontual de simetria ($\text{Ch}7$), referente à fase gama (γ).

Estudos preliminares de caracterização também descrevem o Ag_2WO_4 com suas estruturas cristalinas presentes em cada fase, tendo a fase alfa (α) uma forma ortorrômbica, descrita como um prisma de face reta com ponta ortorrômbica; já a fase beta (β) é caracterizada por sua forma hexagonal, com morfologia de bastões; a fase gama (γ), por sua vez, apresenta uma forma cúbica ou esférica. Além disso, o material pode exibir recobrimento em suas faces, indicando a presença de partículas de prata. Essa característica é visualmente observável e está ilustrada na **Figura 2** (Andrés et al., 2014; Roca et al., 2021).

Esses polimorfos do Ag_2WO_4 são geralmente obtidos sob condições experimentais específicas. Devido à sua instabilidade termodinâmica sob efeito da temperatura e pressão, as fases beta ($\beta\text{-Ag}_2\text{WO}_4$), de estrutura monoclínica, e gama ($\gamma\text{-Ag}_2\text{WO}_4$), de estrutura cúbica, metaestáveis, apresentam limitações em suas aplicações. Por outro lado, a fase alfa ($\alpha\text{-Ag}_2\text{WO}_4$), com estrutura ortorrômbica, destaca-se pela alta estabilidade e facilidade de obtenção, conferindo-lhe uma ampla gama de aplicações potenciais (Cavalcante *et al.*, 2012).

Figura 2 - Imagens de (a) $\alpha\text{-Ag}_2\text{WO}_4$, (b) $\beta\text{-Ag}_2\text{WO}_4$ e (c) $\gamma\text{-Ag}_2\text{WO}_4$ sintetizados em diferentes proporções de concentração de precursores



Fonte: Alvarez-Roca *et al.* (2021).

Do ponto de vista estrutural, os polimorfos de Ag_2WO_4 apresentam uma rede complexa, marcada por uma notável falta de homogeneidade cristalográfica e anisotropia intrínseca associada aos seus blocos constituintes, os agrupamentos $[\text{AgOx}]$ e $[\text{WO}_y]$. Estes possuem ambientes de ligação distintos para os cátions Ag^+ e W^{6+} , coordenados com ânions O^{2-} . O cátion W^{6+} forma três tipos de clusters $[\text{WO}_y]$ ($y = 4, 5$ e 6), enquanto o cátion Ag^+ pode formar diferentes clusters $[\text{AgOx}]$, com variados números de coordenação, $[\text{AgOx}]$ ($x = 2, 4, 5, 6$ e 7). Ademais, o empilhamento desses clusters constroi as estruturas tridimensionais dos polimorfos (Gouveia *et al.*, 2022).

A pesquisa sobre materiais metaestáveis tem sido impulsionada pelo reconhecimento de que essas fases possuem propriedades distintas daquelas termodinamicamente estáveis (Chen *et al.*, 1997). No entanto, a transformação delas em formas mais estáveis apresenta desafios, assim como a necessidade de desenvolver métodos de síntese acessíveis. O aprimoramento de uma modificação de fase específica depende dos fatores termodinâmicos e cinéticos (Roca *et al.*, 2017). Assim, o polimorfismo é um fenômeno crucial com impacto direto nas propriedades funcionais e nas aplicações tecnológicas dos materiais.

Adiante, os átomos de tungstênio, no tungstato de prata (Ag_2WO_4), são coordenados com átomos de oxigênio, formando aglomerados de simetria octaédrica. Essa organização estrutural oportuniza a presença de defeitos cristalinos, distorções nas ligações AgO e WO, e vagas de oxigênio, contribuindo para um alto desempenho na formação de espécies oxidantes, inclusive na geração de pares elétron/buraco. Tais características são essenciais para diversas aplicações, de fotocatalisadores, passando por sensores, até os materiais antimicrobianos (Morris, 2003).

Investigações experimentais de Andrés *et al.* (2014) demonstraram a formação de nanoestruturas de prata através da exposição de microcristais de $\alpha\text{-Ag}_2\text{WO}_4$ ao feixe de elétrons do microscópio eletrônico. Paralelamente, estudos teóricos investigaram o efeito da inserção de elétrons nos aglomerados de prata, na estrutura do tungstato de prata, resultando em um maior potencial de redução para os átomos de prata presentes nos aglomerados de simetria angular. Esse fenômeno aumenta as propriedades bactericidas, fungicidas e antitumorais dos materiais à base de Ag_2WO_4 (Andrés *et al.*, 2014).

Nesse ínterim, Bastos *et al.* (2022) relataram a síntese de micro cristais de tungstato de prata com alta pureza utilizando o método hidrotérmico. A caracterização estrutural foi realizada por meio de difração de raios-X (XRD), espectroscopia vibracional Raman e infravermelha, além de espectroscopia de fotoelétrons de raios-X (XPS). O *band gap* e a morfologia dos microcristais foram investigados por UV-vis, utilizando o módulo de refletância difusa (DRS) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

O desempenho bactericida e fungicida dos materiais sintetizados foi avaliado usando diferentes patógenos, contribuindo para o entendimento das propriedades e

aplicações dos micro cristais de tungstato de prata, e também para o desenvolvimento de novos materiais com potencial uso em áreas como fotocatalise e biomedicina. Os tungstatos metálicos destacam-se como uma classe singular de compostos ternários, apresentando uma ampla gama de propriedades estruturais e ópticas ajustáveis. Eles têm recebido considerável atenção devido às suas notáveis características fotocatalíticas e antimicrobianas, além de sua estabilidade química e fotoestabilidade (Rahimi-Nasrabadi *et al.*, 2017).

A análise de Gouveia *et al.* (2022) demonstrou que a estrutura do polimorfo γ de Ag_2WO_4 é composta por aglomerados $[\text{AgO}_6]$ e $[\text{WO}_4]$. Perturbações nessa simetria resultam em rearranjos estruturais, levando a diferentes formas dos clusters e transições de fase entre os polimorfos. Essas mudanças afetam a distribuição e a estrutura eletrônica dos aglomerados, influenciando diretamente nas propriedades do material. O aumento do uso de semicondutores na vida cotidiana tem impulsionado a pesquisa e o desenvolvimento de novos materiais com aplicações tecnológicas variadas. Entre eles, os óxidos ternários de tungstênio, como os tungstatos metálicos (MWO_4), têm recebido destaque devido às suas características funcionais e potenciais aplicações em vários campos (Andrés *et al.*, 2014).

Dentro dessa família, o tungstato de prata ($\alpha\text{-Ag}_2\text{WO}_4$) emerge como um material inorgânico relevante, com aplicações significativas em fotocatalise, ação antimicrobiana e fotocomutadores, também como alternativa aos semicondutores convencionais de banda larga. Estudos bastante atualizados destacaram o crescimento de nanopartículas metálicas associadas à estrutura do semicondutor $\alpha\text{-Ag}_2\text{WO}_4$, indicando perspectivas promissoras para futuras aplicações (Da Silva *et al.*, 2016; Janáky *et al.*, 2013).

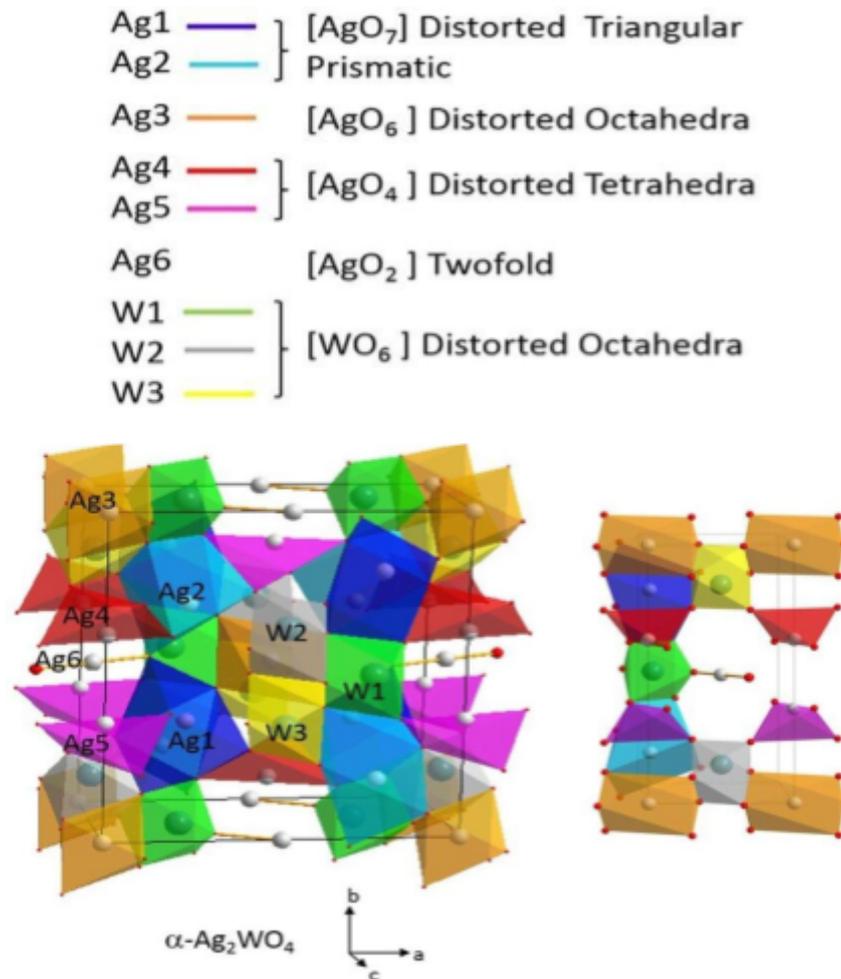
Além disso, recentemente, as pesquisas têm focado na preparação de materiais antimicrobianos para múltiplas aplicações, como apetrechos sanitários e domésticos, embalagens de alimentos, itens médicos e militares, etc. A literatura relata o alto poder contra bactérias gram-negativas e gram-positivas, além de propriedades anticancerígenas (Longo *et al.*, 2014; Selvamani *et al.*, 2016). Diversos estudos têm sido realizados nesse sentido, como os conduzidos pelo Centro de Desenvolvimento de Materiais Funcionais (CDMF), apoiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), que utiliza $\alpha\text{-Ag}_2\text{WO}_4$ como agente antibacteriano e $\beta\text{-Ag}_2\text{MoO}_4$ como agente antifúngico (UFSCar, 2024).

2.6.1.1 Estrutura α -ortorrômbica - α -Ag₂WO₄

A estrutura ortorrômbica do tungstato de prata (α -Ag₂WO₄) baseia-se na organização de átomos de prata coordenados com os de oxigênio, formando aglomerados com simetria angular, tetraédrica, octaédrica e deltaédrica (Bastos *et al.*, 2022). Em termos atômicos, α -Ag₂WO₄ é composto por octaedros [WO₆], bipirâmides pentagonais [AgO₇], octaedros [AgO₆], tetraedros [AgO₄] e configurações angulares [AgO₂], que servem como blocos estruturais fundamentais.

Além disso, observa-se um campo cristalino fraco (De Foggi *et al.*, 2017), conforme mostra a **Figura 3**. Os microcristais da fase α -Ag₂WO₄ apresentam uma morfologia característica, com estruturas hexagonais alongadas em forma de bastão e hastes quadradas, tendo algumas faces mais expostas que outras (Nobre *et al.*, 2019).

Figura 3 - Estrutura α -ortorrômbica- α -Ag₂WO₄

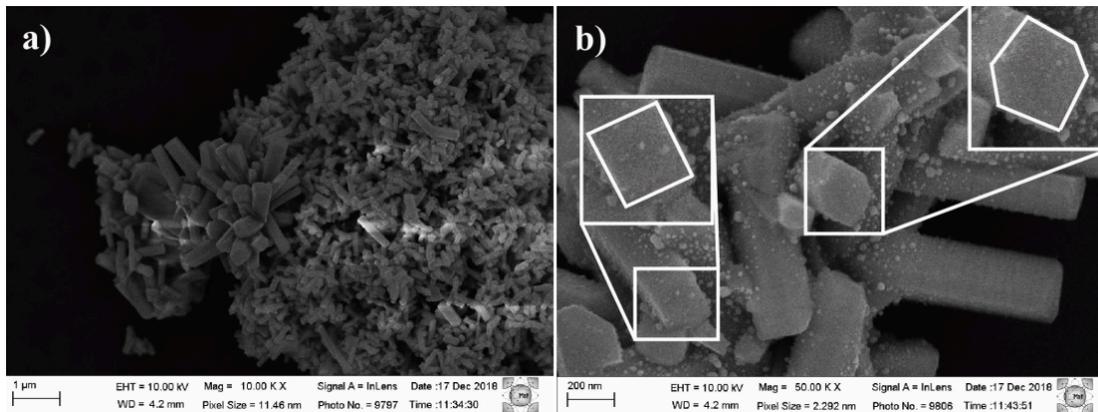


Nota: Representação esquemática da célula unitária correspondente a (a) α -Ag₂WO₄ ortorrômbico. Os números de coordenação do cluster estão destacados.

Fonte: Assis *et al.* (2018).

A morfologia foi identificada por difração de raios-X como pertencente a uma estrutura cristalina α -ortorrômbica. Essa estrutura é ilustrada nas imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura, obtidas por Neto (2022), conforme a **Figura 4**, onde se visualizam cubos alongados e facetados nas extremidades, evidenciando a forma quadrada e hexaédrica dos Nanocristais de α -Ag₂WO₄. As características morfológicas observadas sugerem, por conseguinte, a presença de uma organização bem definida, típica de materiais com alta anisotropia cristalina.

Figura 4 - Nanocristais α -Ag₂WO₄ obtidos por MEV



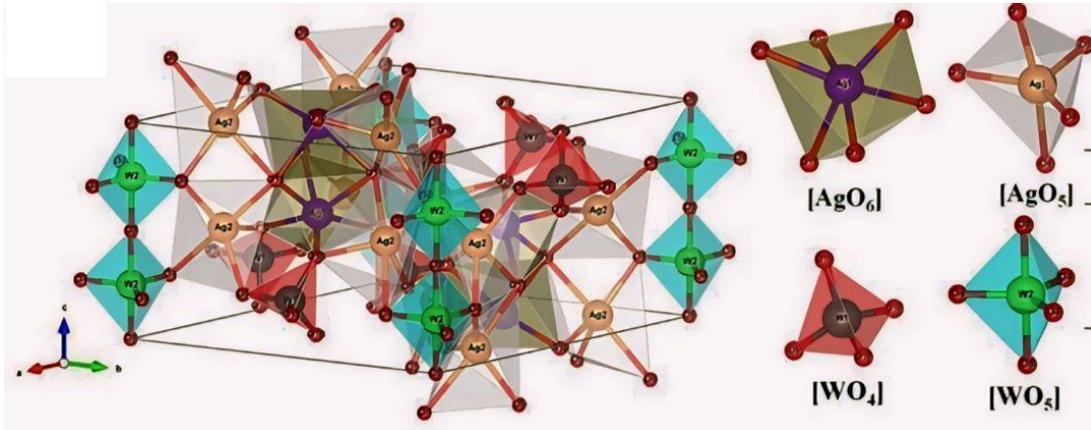
Fonte: Neto (2022).

2.6.1.2 Estrutura β - hexagonal - β -Ag₂WO₄

O β -Ag₂WO₄ possui uma estrutura hexagonal, com seus blocos de construção formados por dois tipos de aglomerados de tungstênio-oxigênio: [WO₄] e [WO₅], coordenados a quatro e cinco átomos de oxigênio, respectivamente. Além disso, a estrutura inclui dois tipos distintos de aglomerados de prata-oxigênio: [AgO₆] e [AgO₅], que estão ligados a seis e cinco átomos de oxigênio, respectivamente (Figura 5). Esses aglomerados proporcionam estabilidade e propriedades estruturais singulares ao material.

Ademais, a síntese de β -Ag₂WO₄ foi relatada pela primeira vez por McKechnie *et al.*, em 1979, conforme aponta Gouveia *et al.* (2022), destacando o interesse contínuo por propriedades eletrônicas e estruturais. A combinação desses diferentes aglomerados contribui para a versatilidade do β -Ag₂WO₄ em várias aplicações tecnológicas.

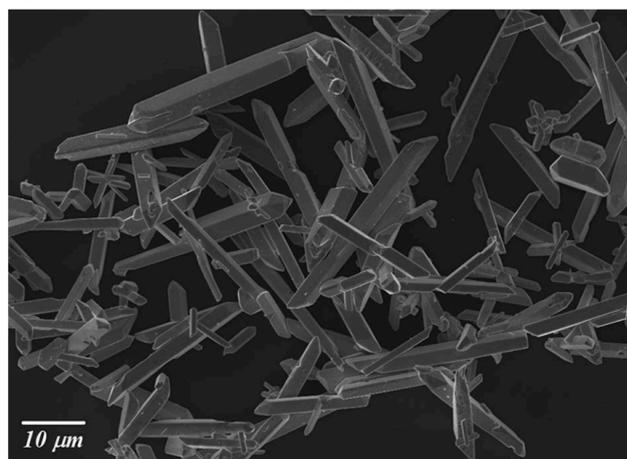
Figura 5 - Representação esquemática de célula unitária correspondente (b) β -Ag₂WO₄ hexagonal



Fonte: Gouveia (2022).

Os microcristais de β -Ag₂WO₄ apresentam uma morfologia alongada, assemelhando-se a bastonetes, com uma distribuição de tamanhos polidispersa, tanto em comprimento quanto em largura (**Figura 6**). Uma análise comparativa das imagens de microscopia realizadas por Alvarez Roca *et al.* (2016) evidenciou a produção de cristais de β -Ag₂WO₄, com variações significativas de tamanho. Adicionalmente, os estudos de Chen *et al.* (2014) apontam que o polimorfo β -Ag₂WO₄ possui uma quantidade maior de defeitos estruturais em comparação com o α -Ag₂WO₄, o que pode influenciar suas propriedades físicas e químicas, tornando-o um material de interesse para diversas aplicações tecnológicas.

Figura 6 - Nanocristais β -Ag₂WO₄ obtidos por MEV

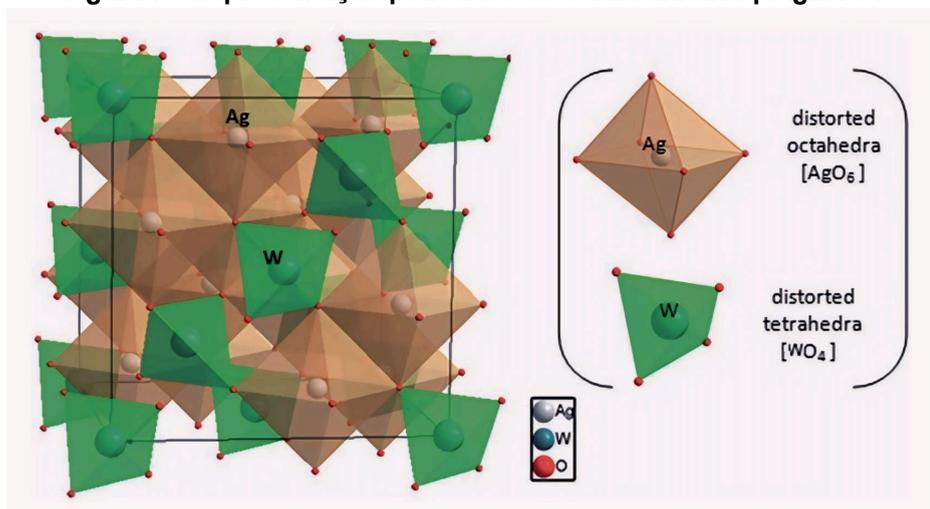


Fonte: Roca (2016).

2.6.1.3 Estrutura γ -cúbica - γ -Ag₂WO₄

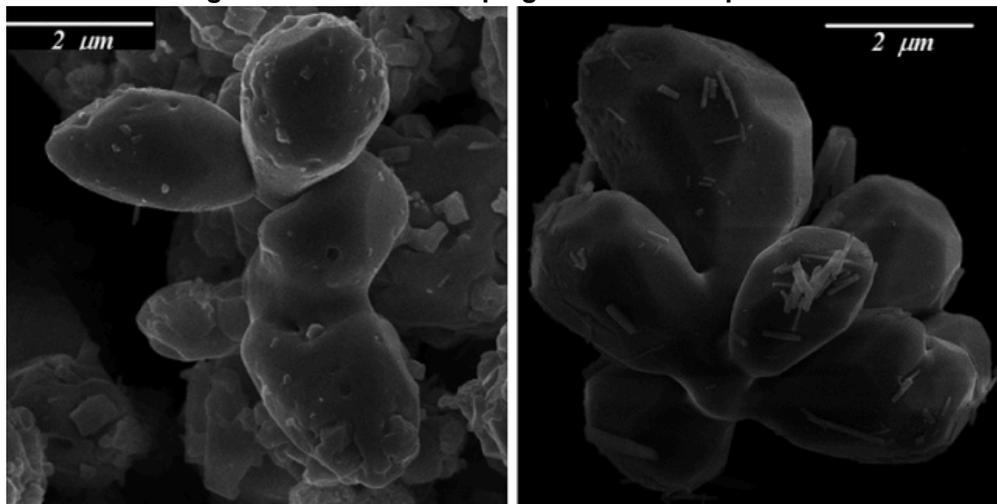
A morfologia da estrutura cúbica do γ -Ag₂WO₄ é composta por dois grupos de átomos poliédricos distorcidos, formando octaedros [AgO₆] e tetraedros [WO₄], como ilustrado na **Figura 7**. Esses grupos poliédricos são responsáveis pela estabilidade da rede cristalina, influenciando diretamente as propriedades ópticas e eletrônicas do material. Além disso, a interação entre esses aglomerados resulta em distorções que podem afetar o comportamento fotocatalítico do γ -Ag₂WO₄ em diferentes condições ambientais.

Figura 7 - Representação poliédrica da célula unitária γ -Ag₂WO₄



Nota: Representa-se a coordenação local dos átomos Ag e W correspondentes aos aglomerados octaédrico [AgO₆] e tetraédrico [WO₄], respectivamente.
Fonte: Roca (2017).

Adiante, tais distorções podem facilitar a separação e migração de pares de elétrons, resultando em buracos que aprimoram o desempenho fotocatalítico do γ -Ag₂WO₄ (**Figura 8**). Esse comportamento é possivelmente a fonte do caráter metaestável dessa fase (Alvarez Roca *et al.*, 2016). A preparação de γ -Ag₂WO₄ metaestável tem sido raramente relatada, e os processos de síntese são frequentemente pouco seletivos, o que resulta na mistura de diferentes polimorfos, afetando significativamente suas dimensões, morfologia, microestrutura e funcionalidade subsequente (Vergani *et al.*, 2021).

Figura 8 - Nanocristais γ -Ag₂WO₄ obtidos por MEV

Fonte: Roca (2017).

A coordenação local do cátion metálico, no volume, corresponde ao número específico de ânions de oxigênio circundantes. No entanto, esses aglomerados apresentam subcoordenação nas superfícies, ou seja, um número menor de ânions de oxigênio ao redor de Ag, responsável pela maioria das propriedades semicondutoras (Gouveia *et al.*, 2022).

De forma geral γ -Ag₂WO₄, tem sido investigado devido à sua fácil obtenção e boa resposta. A cristalização de uma segunda fase na heteroestrutura pode causar dissolução total ou parcial da estrutura inicial, formando fases não estequiométricas de seus óxidos ou metaestáveis (por exemplo, W₅O₁₄ e Mo₈O₂₃), como ocorre em α -Ag₂WO₄/ β -Ag₂WO₄, cuja síntese inicial de α -Ag₂WO₄ é realizada em pH 7 (Jacomaci *et al.*, 2019).

De acordo com o pensamento de Gouveia, (2022), um dos objetivos mais almejados, na ciência dos materiais, é adquirir conhecimentos e compreender integralmente as diferentes fases de um material. Isso é essencial para identificar qual polimorfo é mais adequado para uma aplicação tecnológica específica.

2.7 Síntese do tungstato de prata

A síntese do tungstato de prata pode ser realizada por meio de diversos métodos, cada um com suas vantagens e desvantagens específicas. Entre os métodos mais comuns estão a coprecipitação, métodos hidrotérmicos, reações no

estado sólido e métodos sonoquímico (Foggi *et al.*, 2017; Pirhashemi; Habibi-Yangjeh, 2017). Adiante, analisaremos cada um desses métodos, destacando suas peculiaridades e relevância na produção de tungstato de prata.

2.7.1 Reação no estado sólido

Os métodos de síntese em estado sólido são amplamente utilizados para obter o polimorfo mais estável de compostos inorgânicos. No entanto, a obtenção de polimorfos menos estáveis requer condições de não-equilíbrio ou metaestáveis, alcançáveis após a extinção de intermediários de reação, ou por métodos de síntese variados (Vergani *et al.*, 2021). Segundo Khatua *et al.*, (2018), apesar de sua utilidade, a síntese em estado sólido apresenta desvantagens significativas, como a necessidade de longos tempos de contato entre os sais para garantir uma reação completa. Além disso, geralmente é necessária uma etapa adicional de calcinação, aumentando a complexidade do processo, assim o controle da morfologia do produto final é limitado, resultando frequentemente em grandes aglomerados micrométricos (Zhu; Wang, 2017).

2.7.2 Síntese sonoquímica

A síntese sonoquímica utiliza ondas ultrassônicas para induzir reações químicas em soluções. No caso do tungstato de prata, a energia ultrassônica aplicada a uma solução contendo precursores de prata e tungstênio gera bolhas de gás por cavitação. O colapso dessas bolhas cria regiões de alta pressão e temperatura, facilitando a nucleação e crescimento dos cristais de Ag_2WO_4 (Nobre *et al.*, 2019). Este método oferece vantagens, como a rápida formação de partículas finas e homogêneas, devido às condições controladas e à alta energia das ondas ultrassônicas. Nessa perspectiva, Gouveia (2022) explica que ajustes precisos na potência ultrassônica, concentração dos precursores e tempo de reação são essenciais para otimizar a síntese, garantindo alta pureza e eficiência do produto.

2.7.3 Síntese hidrotermal assistida por micro-ondas

A síntese hidrotermal assistida por micro-ondas combina a síntese hidrotermal tradicional e a aplicação de micro-ondas, proporcionando calor e alta pressão que aceleram a formação do composto desejado de forma eficiente (Jacomaci *et al.*, 2019). Esse método oferece maior controle sobre as condições reacionais, resultando em produtos com alta pureza e homogeneidade. Ajustes precisos nos parâmetros, como temperatura e pressão, são necessários para alcançar os resultados desejados (Gouveia *et al.*, 2022). Logo, tal técnica se destaca pela capacidade de melhorar as taxas de reação e promover a cristalização, devido ao aumento do número de choques efetivos e elevadas taxas de aquecimento.

2.7.4 Coprecipitação

A coprecipitação é um método direto e eficiente para a síntese de tungstato de prata. Nesse processo, íons de prata e tungstato são combinados em solução, resultando na formação de um precipitado sólido. A simplicidade do método, que não requer equipamentos específicos, e a capacidade de controlar a morfologia das partículas, fazem da coprecipitação uma técnica amplamente utilizada (Sim *et al.*, 2019). Além disso, o método permite a obtenção de produtos com alta pureza e uniformidade, sendo o ideal para aplicações tecnológicas e de pesquisa específicas (Pinatti *et al.*, 2015).

2.7.5 Síntese hidrotérmica

A síntese hidrotérmica envolve a reação controlada de precursores de prata e tungstato em um ambiente de alta pressão e temperatura. É um método amplamente reconhecido pela produção de partículas com tamanhos e formas bem definidos, além do alcance de elevada pureza e homogeneidade. Ajustes cuidadosos nos parâmetros de temperatura, pressão e concentração dos precursores são essenciais para garantir a obtenção do produto desejado (Cavalcante *et al.*, 2012). A capacidade de controlar essas variáveis permite a personalização das propriedades estruturais e morfológicas, o que torna esse método particularmente versátil.

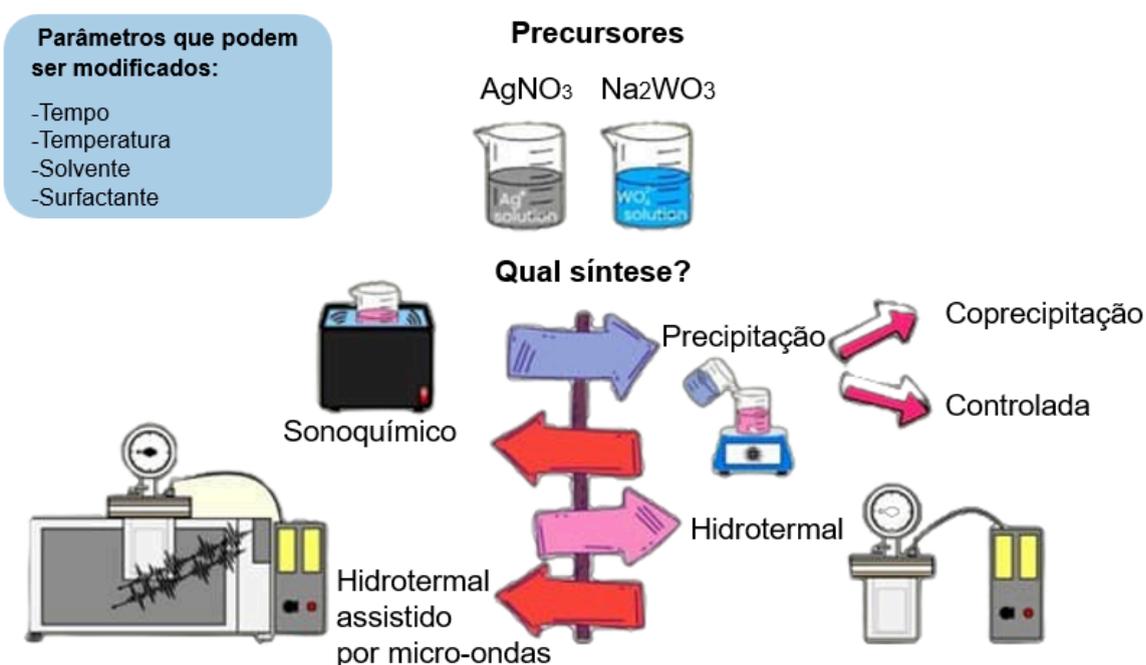
De acordo com Gouveia (2022), a técnica tem atraído grande interesse, devido ao uso de solventes ecológicos, como a água, e também por conta de sua operação em temperaturas relativamente baixas, o que oferece vantagens

ambientais significativas. Esses aspectos tornam a síntese hidrotérmica uma abordagem sustentável, especialmente quando comparada a métodos mais tradicionais, que requerem condições severas de reação ou solventes tóxicos.

Entre os métodos analisados, como a reação no estado sólido e a síntese hidrotérmica assistida por micro-ondas, observa-se um controle preciso da estrutura cristalina. Já a síntese sonoquímica e a coprecipitação, destacam-se pela simplicidade e eficiência no controle da morfologia das partículas. A **Figura 9** sintetiza essas técnicas, ressaltando suas principais características. A escolha do sistema mais adequado depende diretamente das necessidades específicas da aplicação desejada, bem como das condições experimentais disponíveis.

Nesse contexto, a compreensão detalhada das vantagens e limitações de cada técnica é crucial para o desenvolvimento de processos de síntese eficientes. Ao dominar essas maneiras, torna-se possível não apenas otimizar a produção, mas também expandir a descoberta de novos materiais multifuncionais que atendam a demandas tecnológicas emergentes.

Figura 9 - Procedimentos aplicados na síntese dos diferentes polimorfos de materiais à base de Ag_2WO_4



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

2.7.6 Tungstato de prata e suas propriedades antibacterianas

Em função da expressiva resistência que diferentes classes de bactérias têm apresentado aos antibióticos, atualmente são financiados investimentos bilionários para a obtenção de novos compostos eficazes no controle desses microrganismos (Bastos, 2022). A prata, em sua forma iônica (Ag^+), é um antimicrobiano ambientalmente amigável amplamente utilizado contra muitas espécies de bactérias, incluindo *Escherichia Coli* (Dror-Ehre *et al.*, 2009).

Selvamani (2016), em suas pesquisas, sintetizou diversos compostos à base de prata, contendo prata iônica (Ag^+) ou prata metálica (Ag^0), todos exibindo atividade antimicrobiana contra várias bactérias. O modelo de oxidação das cadeias de fosfolipídios na parede bacteriana e lise celular de *Staphylococcus aureus* foi investigado, evidenciando a presença de prata metálica na superfície dos microcristais de Ag_2WO_4 .

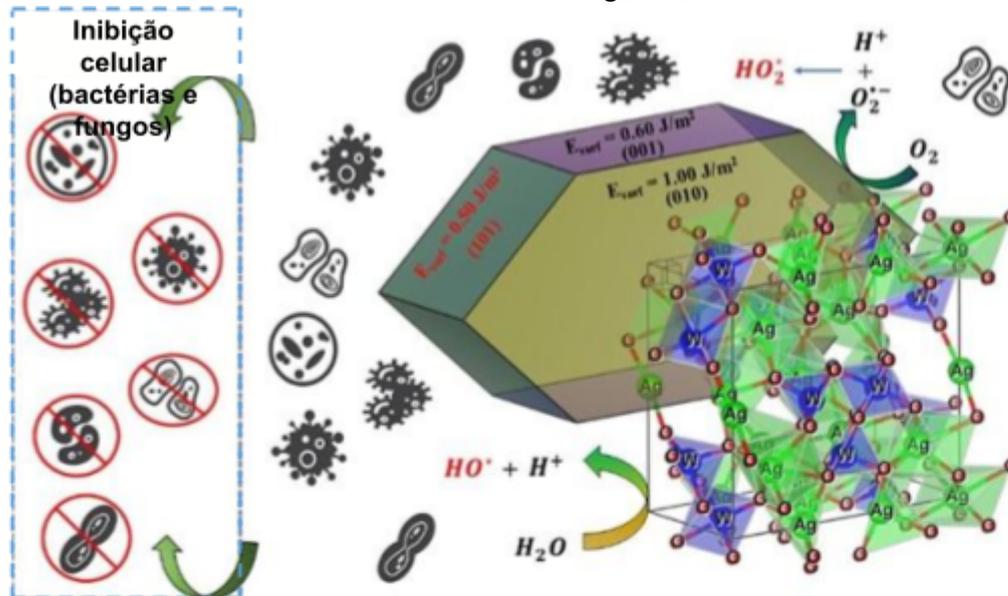
Essa presença, associada a espécies oxidantes, resulta na degradação do biofilme e na inibição das atividades regulares do microrganismo, levando à necrose e morte celular (Nobre *apud* Longo, 2014). Nobre (2019) avaliou o uso do Ag_2WO_4 e quantificou valores de Concentração Inibitória Mínima (CIM) no crescimento das bactérias. Os resultados foram considerados moderadamente ativos para todos os microcristais com CIM inferior a $100 \mu\text{g mL}^{-1}$, indicando boa atividade antimicrobiana. Entre 100 e $500 \mu\text{g mL}^{-1}$, moderadamente ativa; entre 500 e $1000 \mu\text{g mL}^{-1}$, pouco ativa; e CIM superior a $1000 \mu\text{g mL}^{-1}$, inativa. Para *Escherichia coli*, os resultados mostraram um potencial antimicrobiano nitidamente superior em comparação com bactérias gram-positivas como *Staphylococcus aureus*, apresentando valores de CIM de $62,5$, $32,25$, $32,25$, $32,25$ e $15,62 \mu\text{g mL}^{-1}$.

A maior suscetibilidade de *E. coli* ao rompimento da membrana bacteriana está associada às suas características morfológicas e fisiológicas, típicas de bactérias gram-negativas. Segundo Nobre (2019), a adesão das bactérias à superfície dos microcristais favorece a oxidação e a ruptura das cadeias carbônicas presentes na membrana bacteriana, devido à menor espessura do biofilme, composto basicamente por lipoproteínas, polissacarídeos e fosfolipídios.

Nos processos de interação dos microrganismos com a superfície dos microcristais, além das propriedades plasmônicas das partículas, ocorre a oxidação

das nanopartículas metálicas, que, posteriormente, entram na célula do microrganismo via endocitose (**Figura 10**).

Figura 10 - Esquema proposto para o mecanismo de inibição antimicrobiana utilizando os microcristais de $\alpha\text{-Ag}_2\text{WO}_4$



Fonte: Adaptado de Nobre (2022).

No citosol, promovem-se reações de substituição de enxofre, impedindo a síntese de substâncias essenciais para a sobrevivência e replicação celular, como proteases, enzimas fosfolipases e a protease aspártica em fungos (Nobre *et al.*, 2019). Com base nos resultados obtidos, é plausível considerar a ação antimicrobiana das nanopartículas de prata (Ag^0) presentes na superfície dos microcristais.

Observa-se a modificação da superfície devido à redução da prata (Ag^0) no interior das estruturas, predominantemente dos clusters $[\text{AgO}_2]$ e $[\text{AgO}_4]$, que se deslocam para a superfície dos microcristais na forma de nanopartículas de Ag^0 (Nobre *et al.*, 2019). As propriedades dos materiais dependem da morfologia e das superfícies expostas, de modo que a interação entre molécula/bactéria e os sítios ativos na superfície do sólido determina sua atividade em catálise heterogênea e como agente antibacteriano.

Portanto, é essencial caracterizar detalhadamente a estrutura da superfície e as propriedades eletrônicas dos materiais para entender os processos de adsorção e degradação nas superfícies expostas dos polimorfos. No entanto, as técnicas

experimentais frequentemente adotadas para tal caracterização não são suficientemente sensíveis à superfície superior do sólido (Roca *et al.*, 2021).

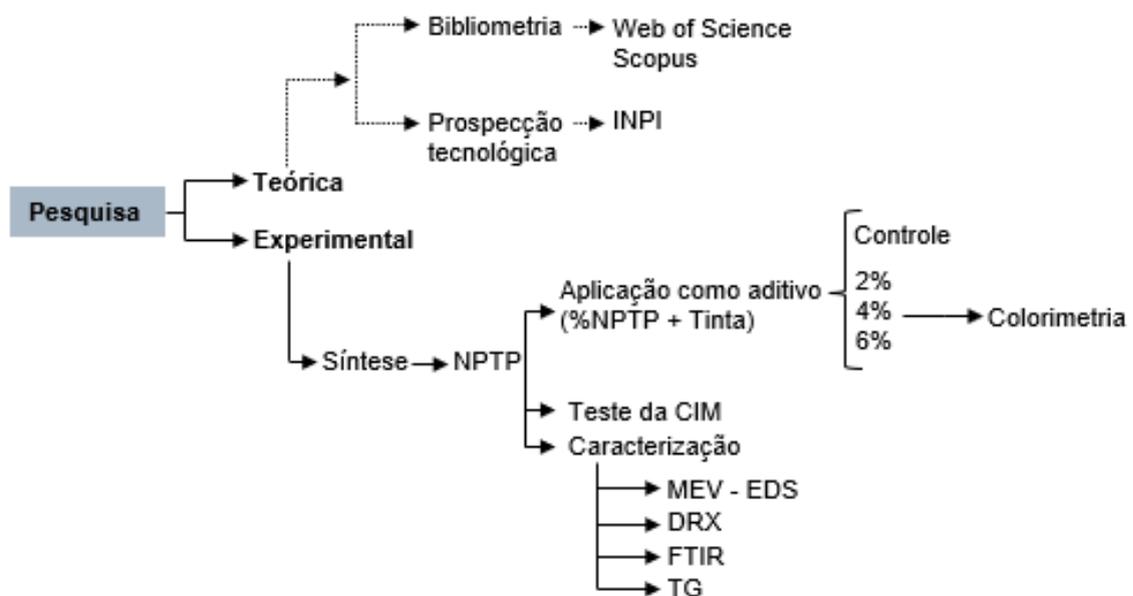
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Principais etapas da pesquisa

3.1.1 Fluxograma de pesquisa

A estrutura desta pesquisa está organizada em dois momentos principais: a pesquisa teórica e a experimental, o que está ilustrado no **Quadro 11**. A primeira parte envolve revisão e análise de conceitos teóricos relevantes, bem como a prospecção tecnológica, enquanto a segunda foca na execução prática dos experimentos planejados para validar as hipóteses levantadas.

Quadro 11 - Fluxograma da pesquisa



Fonte: O autor (2025).

3.2 Pesquisa teórica

3.2.1 Levantamento bibliométrico e prospecção tecnológica

A bibliometria é um campo de estudo na ciência da informação que utiliza uma abordagem quantitativa para analisar dados bibliográficos, tais como ano de publicação, atuação de países, periódicos e autores (Merigó *et al.*, 2018; Pimenta *et*

al., 2017). Essa análise gera indicadores que mensuram a produtividade científica, estabelecem relações e identificam a concorrência de elementos e interações entre diferentes agentes. A habilidade da bibliometria de manejar grandes volumes de dados e realizar análises objetivas e confiáveis, tem levado à sua crescente aplicação em diversas áreas do conhecimento (Aria; Cuccurullo, 2017). Além disso, os indicadores bibliométricos são essenciais para avaliar os resultados dos esforços em pesquisa, ciência e tecnologia. Na análise bibliométrica, a identificação das palavras-chave de busca é uma das etapas mais importantes, pois tem grandes impactos nos resultados do estudo.

Na maioria dos casos, a literatura tem considerado a consulta de pesquisa (1) usando conceitos literais genéricos (por exemplo, *paint antimicrobial*); (2) utilização de curingas (*wild cards*) para representar diferentes combinações de caracteres na construção de uma consulta (e.g., *paint antimicrobial*"); (3) usar termos relacionados semanticamente orientados por especialistas, para identificar uma coleção extensa de palavras-chave (e.g., *paint antimicrobial*, *paint antibacterial*, *paint biocide*); (4) e os operadores booleanos (e.g., *paint AND (antimicrobial OR biocide OR antibacterial)*) (Scopus 2024). O operador booleano 'AND' é usado para ligar os dois campos, enquanto 'OR' é usado para combinar os dois campos. Usamos uma combinação de todas as quatro opções mencionadas acima.

Para o levantamento bibliométrico científico e tecnológico, foram desenvolvidas quatro 'strings' de busca (cadeias de termos), divididas em dois temas principais. Cada tema utilizou uma string geral, com o objetivo de proporcionar uma visão ampla do cenário atual da produção científica, e uma string mais restrita, focada nos aspectos específicos deste estudo. Para o tema de tintas com biocidas:

- String Geral: *Paint AND (antimicrobial OR biocide OR antibacterial)*, utilizada para capturar um panorama mais amplo dos estudos relacionados a tintas antimicrobianas ou biocidas, como o volume produzido sobre o assunto;
- String Específica: *Building AND Paint AND (antimicrobial OR biocide OR antibacterial)*, direcionada para estudos específicos sobre o uso de tintas com biocidas no setor de construção.

Já para o tema de tungstato de prata:

- String Geral: *Silver AND Tungstate*, voltada para identificar o contexto científico mais amplo do uso de tungstato de prata;
- String Específica: *Silver AND Tungstate AND (antimicrobial OR biocide OR antibacterial)*, focada nos estudos que abordem a aplicação do tungstato de prata com propriedades antimicrobianas.

As pesquisas utilizando strings gerais têm como objetivo oferecer uma visão ampla do campo de estudo, ajudando a estabelecer um panorama inicial da produção científica sobre os temas. Em seguida, as strings mais restritas, diretamente relacionadas ao foco deste estudo, serão analisadas em profundidade, para a interpretação e discussão dos resultados.

Com relação ao assunto tintas, utiliza-se um filtro temporal, a partir de 2005, de modo a trabalhar com publicações mais recentes de avanços tecnológicos. Não houve delimitação quanto ao ano de publicação sobre tungstato de prata como antimicrobiano, permitindo uma análise abrangente da evolução do conhecimento ao longo do tempo. As pesquisas foram realizadas nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*, utilizando o RStudio, linguagem de programação estatística de código aberto.

Realizou-se a mesclagem dos documentos e a eliminação dos duplicados, obtendo-se, assim, os arquivos finais em formato .CSV e .TXT. Abaixo, na **Tabela 1**, os arquivos destacados nas linhas verdes (restritos) foram utilizados para gerar gráficos e análises visuais dos dados bibliométricos, referentes aos assuntos pesquisados.

Tabela 1 - Levantamento e filtragem dos dados bibliométricos

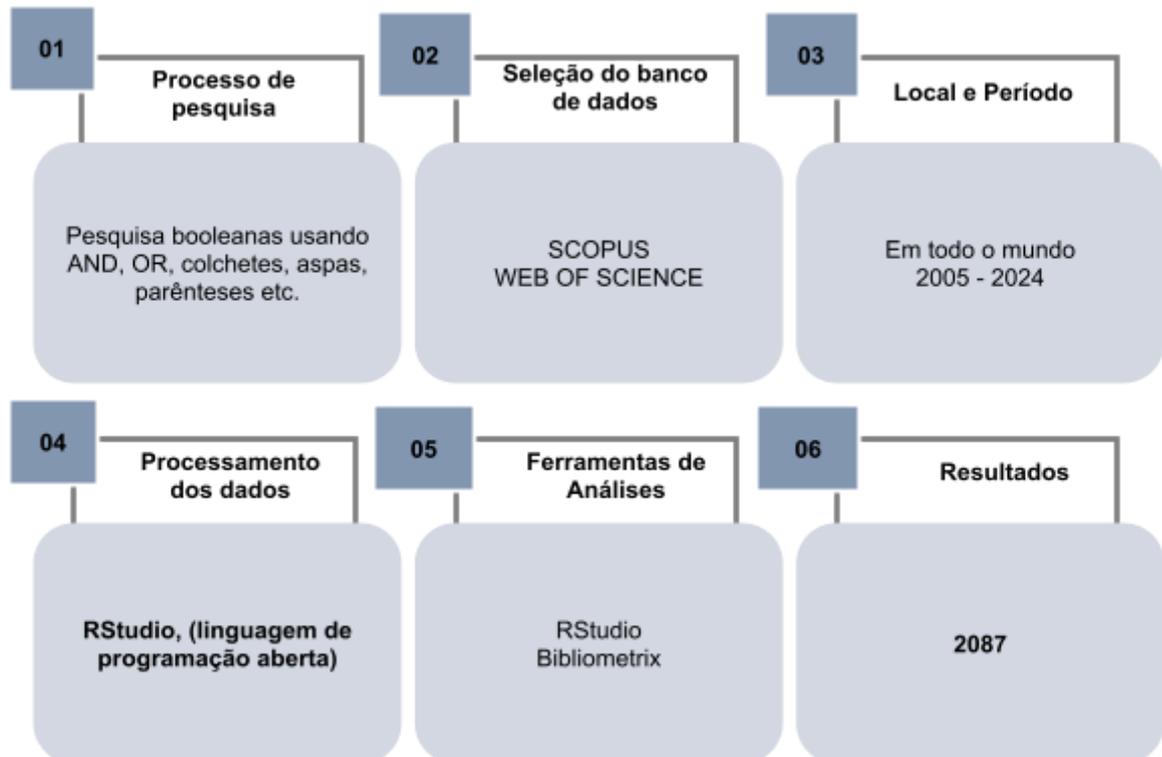
Assunto	String	Scopus	WoS	Filtros	
				RStudio	
				Duplicado / Eliminados	Total
Tintas Antimicrobianas	Paint AND (antimicrobial OR biocide OR antibacterial)	1367	1418	698	2087
	Building AND Paint AND (antimicrobial OR biocide OR antibacterial)	111	140	53	198
	Silver AND Tungstate	403	295	95	603

Tungstato de Prata	Silver AND Tungstate AND (antimicrobial OR biocide OR antibacterial)	22	29	11	40
--------------------	--	----	----	----	----

Fonte: O autor (2025).

Como exemplo do processo de levantamento de dados das produções científicas, o **Quadro 12** ilustra o caminho seguido para a coleta de informações. Esse processo foi padronizado e adotado como modelo de referência, especialmente para a coleta de dados relativos às strings mais restritas, conforme mencionado anteriormente. Esse fluxo sistemático garante a consistência na coleta e facilita a análise dos dados, que serão examinados posteriormente.

Quadro 12 - Exemplo de quadro metodológico de análises bibliométricas



Nota: Quadro da pesquisa mais abrangente sobre o assunto Tintas antimicrobianas, com a string 'Paint AND (antimicrobial OR biocide OR antibacterial)'.

Fonte: O autor (2025).

3.2.2 Levantamento em bases de dados científicas

Inicialmente, foram conduzidas pesquisas preliminares para testar as bases de dados, estimar o volume de trabalhos disponíveis e avaliar a necessidade de variação de palavras-chave. As bases utilizadas foram as plataformas *Scopus* e *Web*

of Science, escolhidas por suas abrangências e pela concentração da maioria dos artigos produzidos sobre o tema. Em ambas as plataformas, utilizou-se o sistema de busca padrão, aplicando strings de busca com operadores booleanos para pesquisar por título, resumo e palavras-chave.

As buscas foram abrangentes, não sendo restritas apenas a artigos de pesquisa (*articles*) publicados em periódicos (revistas e jornais científicos) ou apresentados em conferências e congressos (conference papers/proceedings papers). Para garantir a relevância e a qualidade dos estudos selecionados, foram aplicados critérios rigorosos de inclusão e exclusão, considerando aspectos como impacto do periódico e relevância temática. Além disso, as buscas foram limitadas à Língua Inglesa, considerando que mesmo artigos publicados em outros idiomas geralmente possuem títulos e resumos em inglês.

Para a string '*Building AND Paints AND (antimicrobial OR biocide OR antibacterial)*', que representa a busca mais restrita (objeto de análise bibliométrica a ser discutida posteriormente) relacionada à produção de tintas com biocidas, a **Tabela 2** detalha o desenvolvimento da pesquisa, os filtros utilizados e a produção encontrada em cada etapa. Um total de 86 documentos foram selecionados para análises e estudos. Ferramentas como RStudio e o plugin Biblioshiny foram empregadas para mesclar os documentos, eliminar duplicatas e realizar a análise bibliométrica. Isso permitiu identificar tendências, lacunas e impacto das pesquisas ao longo do tempo.

Tabela 2 - String de busca e filtros

DATA	BUSCA	FILTRO	SCOPUS	WoS.
04.06.2024		2005 -2024	111	140
04.06.2024	Building AND Paints AND (antimicrobial OR biocide OR antibacterial)	Alinhados com o Título e Resumos	62	44
04.06.2024		RStudio, (unificação das listagens) com 20 documentos duplicados removidos	86	

Fonte: O autor (2025).

Para a string '*Silver AND Tungstate AND (antimicrobial OR biocide OR antibacterial)*', relacionada ao material e às propriedades bactericidas do tungstato

de prata, a **Tabela 3** detalha o processo das buscas, seguindo o mesmo padrão da procura anterior (com análise bibliométrica mais adiante). Após a leitura dos títulos e resumos, foram selecionadas 20 obras com maior aderência ao tema de investigação proposto. Após a mesclagem no RStudio, apenas um documento foi identificado como duplicado e removido da listagem final.

Tabela 3 - String de busca e filtros

DATA	BUSCA	FILTRO	SCOPUS	WoS.
04.06.2024		-----	22	29
04.06.2024	Silver AND Tungstate AND (antimicrobial OR biocide OR antibacterial)	Alinhados com o Título e Resumos	10	11
04.06.2024		RStudio, (unificação das listagens) com 01 documento duplicado removido	20	

Fonte: O autor (2025).

3.2.3 Prospecção tecnológica

Utilizando a base de dados do Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), procedeu-se com a leitura dos títulos das patentes, para identificar aquelas relacionadas às tintas biocidas. Esse processo teve início em 04 de abril de 2024, utilizando a expressão ‘Tinta Imobiliária Antibacteriana’ como palavra-chave aproximada, resultando em um total de 5.642 títulos. Posteriormente, sucedeu-se um processo de inclusão e exclusão das patentes, baseado na leitura dos títulos, com o objetivo de verificar sua proximidade com o tema em questão.

Foram consideradas as patentes que abordavam o tema de tintas, especialmente para aplicação na construção civil, e que apresentassem alguma capacidade funcional biocida ou similar. Os resultados obtidos foram importados para uma planilha eletrônica no formato .XLSX, onde os títulos foram lidos e as patentes de interesse foram selecionadas. Em seguida, foi realizada uma leitura completa dos textos das patentes selecionadas, excluindo aquelas que não se adequassem ao tema ou não mencionassem produtos relacionados a tintas imobiliárias ou civis, com função biocida ou similar, e presença, ou não, do tungstato de prata.

Após essa fase de seleção, elaborou-se um portfólio tecnológico com as patentes escolhidas, seguido pela realização de análises tecnométricas. Esse processo permitiu a organização e análise detalhada das informações obtidas, visando identificar as patentes mais relevantes para o estudo em questão.

3.3 Pesquisa experimental

3.3.1 Síntese do tungstato de prata (Ag_2WO_4)

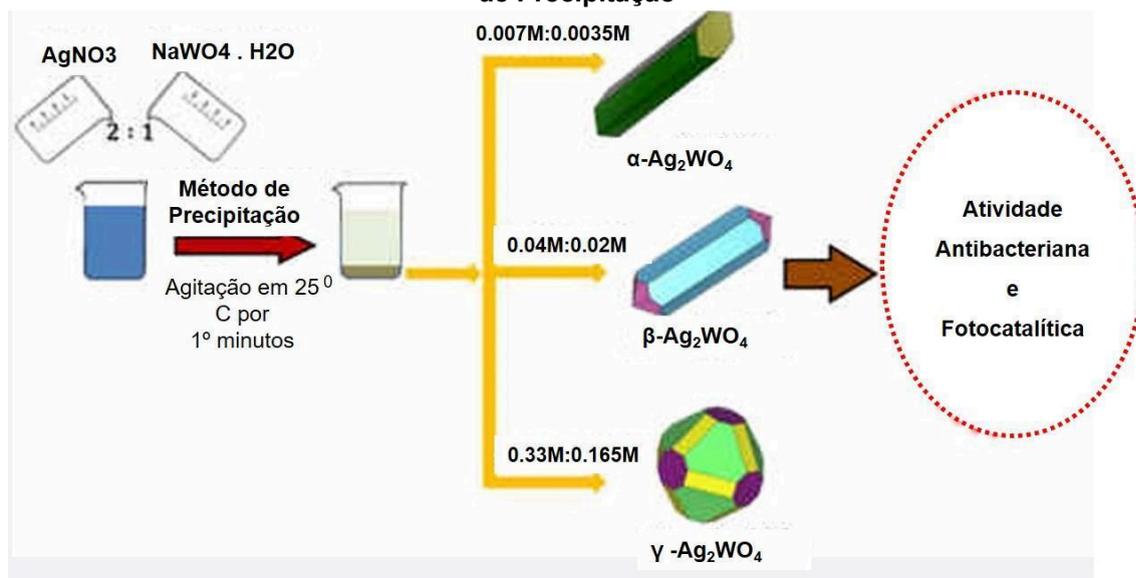
Para a síntese do Tungstato de Prata (Ag_2WO_4), os procedimentos descritos seguiram a metodologia proposta por Alvarez-Roca *et al.* (2020). Dois reagentes, o tungstato de sódio ($\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) e o nitrato de prata (AgNO_3) foram pesados separadamente, em um béquer de 50 ml. Para a formação de alfa (α), foram pesados 0,169 g de nitrato de prata ($0,040 \text{ mol L}^{-1}$) e 0,165 g de tungstato de sódio ($0,020 \text{ mol L}^{-1}$); para beta (β), foram pesados 0,029 g de nitrato de prata ($0,007 \text{ mol L}^{-1}$) e 0,028 g de tungstato de sódio ($0,003 \text{ mol L}^{-1}$), já para gama (γ), foram pesados 1,401 g de nitrato de prata ($0,330 \text{ mol L}^{-1}$) e 1,360 g de tungstato de sódio ($0,165 \text{ mol L}^{-1}$).

Após a pesagem, esses reagentes foram diluídos em 12,5 ml de água destilada e, para que ocorresse a solubilização desse material, promoveu-se a agitação mecânica (marca Allerbest) por cinco minutos. Assim que finalizado esse processo, os reagentes são combinados em um béquer, sem a adição de surfactantes, sendo a principal característica dessas amostras, partículas coloidais de coloração amarelada. Assim, para a finalização do processo, é refeita a agitação mecânica por dez minutos, resultando em um precipitado de coloração branca. Essas amostras foram colocadas em tubo Falcon de 50 ml para centrifugação (CT 5000-R), conforme ilustrado pela **Figura 11**.

As amostras foram centrifugadas a 3000 rpm por cinco minutos, após a conclusão desse procedimento, o sobrenadante líquido foi descartado e adicionado 10 ml de acetona PA, para lavar e homogeneizar as amostras. Em seguida, as amostras foram novamente submetidas à centrifugação por cinco minutos, após a conclusão do procedimento anterior, foram adicionadas novamente 10 ml de acetona PA ao tubo Falcon, seguido de homogeneização. A mistura resultante foi transferida para um cadinho de porcelana e levada à estufa a 60°C , por 2 horas, para secagem, permitindo a evaporação da acetona.

Com a formação do tungstato de prata, foram pesados 0,025 g desse material em um balão volumétrico de 50 ml, e acrescentado metanol (CH_3OH) (5%) até o menisco do balão volumétrico. Essa diluição foi utilizada para fazer a metodologia da concentração inibitória mínima (CIM).

Figura 11 - Processo de síntese do Tungstato de Prata em suas 3 fases polimorfas pelo método de Precipitação



Fonte: Alvarez-Roca et al. (2021).

3.3.2 Caracterização do tungstato de prata

A amostra de Ag_2WO_4 foi utilizada como objeto de análise com o objetivo de levantar suas características físicas e químicas, cujas medidas foram realizadas através dos métodos analíticos descritos no **Quadro 13**.

Quadro 13 - Metodologias analíticas de caracterização física, química e mineralógica dos materiais

Características	Método
Propriedades térmicas	Termogravimetria – TGA Calorimetria Exploratória Diferencial - DSC
Cristalografia	Difração de Raios X - DRX
Análise molecular de superfície	Espectroscopia com Refletância Total Atenuada no infravermelho com Transformada de Fourier – FTIR – ATR
Composição química elementar	Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios X – EDS

Fonte: O autor (2025).

A análise termogravimétrica (TGA), em condições não-isotérmicas, foi conduzida em um *Simultaneous Thermal Analyzer* (STA-6000), da Perkin Elmer. A amostra de massa usada em cada experimento varia entre 10 e 15 mg, aproximadamente. As curvas termogravimétricas foram obtidas usando-se três diferentes taxas de aquecimento (3, 5 e 10 K min⁻¹), no intervalo de 300 K a 975 K, sob atmosfera de ar comprimido e com fluxo mantido em 20 mL min⁻¹. A reprodutibilidade dos experimentos foi garantida pelo uso de triplicatas em cada taxa de aquecimento.

Para a análise de difratometria (DRX) das amostras, utilizou-se o difratômetro *Empyrean*, da Panalytical, com raios X de comprimento de onda $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$, aplicando tensão de 40kV e corrente de 40mA a um alvo de cobre. Os dados foram coletados com base na varredura em 2θ entre 10° e 100°, em temperatura ambiente. Os espectros de intensidade de transmissão do infravermelho (FTIR-ATR) das amostras foram obtidos por um analisador infravermelho Perkin Elmer Frontier™, na faixa de comprimento de onda de 550 a 4000 cm⁻¹.

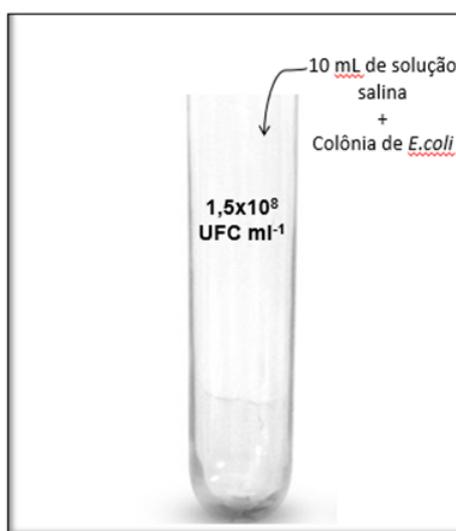
A morfologia e a composição química elementar das amostras foram obtidas por microscopia eletrônica de varredura Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da marca Zeiss, Modelo EVO-MA10, juntamente com a análise por espectroscopia de dispersão de energia de raios X (EDS), com detector de raios X da fabricante Oxford. As imagens das superfícies captadas pelo MEV são obtidas com magnificação entre 500 e 1500.

3.3.3 Teste para obtenção da Concentração Inibitória Mínima (CIM)

Para o teste de obtenção da concentração inibitória mínima (CIM) utilizou-se como microrganismo-alvo, a cepa padrão (ATCC 43888) da bactéria *Escherichia coli*. A cepa armazenada sob congelamento, no laboratório de Microbiologia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Medianeira, foi ressuspensa em caldo *Brain Heart Infusion* (BHI), com posterior semeadura em meio sólido ágar nutriente, através da técnica de esgotamento em estrias, para obtenção de colônias isoladas.

Após o crescimento das bactérias em ágar nutriente, por um tempo de 18 a 24 horas, realizou-se a extração de inóculos (3 a 5 colônias) das amostras, e, submeteu-se-as a uma solução salina de 0,85% no volume de 10 ml, até apresentar uma turvação que conferia com o tubo 0,5 da escala Mc Farland, equivalente a $1,5 \times 10^8$ UFC ml^{-1} (**Figura 12**).

Figura 12 - Tubo de ensaio com sua concentração equivalente para comparação da escala Mc Farland com a adição da solução microbiana



Fonte: O autor (2025).

A determinação do CIM é realizada utilizando-se a metodologia descrita pela *Brazilian Committee on Antimicrobial Susceptibility Testing* (BrCAST). Para o processo da diluição, com vistas à obtenção das concentrações a serem aplicadas nos poços, foram utilizados oito béqueres, contendo 8 mL do caldo Mueller Hinton (MH) em cada, sendo que, no béquer com fator de concentração 64, foram acrescentados 14,976 mL do caldo Mueller Hinton (MH), junto aos 8 ml que já continham no béquer, e mais uma solução de 1,024 ml de Ag_2WO_4 . Para o processo de diluição, foi transferido 8 mL de amostra do béquer 64 para o béquer de 32, e assim subsequentemente, até o béquer 1; o béquer identificado como zero foi utilizado como controle positivo sem a presença do Ag_2WO_4 .

Com o meio de cultura preparado, foram utilizadas três microplacas para avaliar o efeito de diferentes concentrações de Ag_2WO_4 nas fases alfa, beta e gama, conforme apresentado na **Tabela 4**. Em cada micropoço foram pipetados 50 μL de meio de cultura Muller Hinton (MH) misturado com Ag_2WO_4 , e 50 μL de uma solução

contendo a bactéria *E. coli*. As microplacas foram incubadas em estufa microbiológica, a $37 \pm 1^\circ\text{C}$, por 24 horas. Após o período de incubação, observou-se a presença ou ausência de turvação nos poços. A turvação indica crescimento microbiano, enquanto a ausência de turvação sugere inibição do crescimento ou morte do microrganismo. A **Tabela 4** apresenta os valores de fator de diluição e suas respectivas concentrações.

Tabela 4 - Soluções com diferentes concentrações de Ag_2WO_4 para a determinação da CIM

Fator de Concentração	Concentração de Ag_2WO_4 - ($\mu\text{g/ml}$)
0	0
1	0,5
2	1
4	2
8	4
16	8
32	16
64	32

Fonte: O autor (2025).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise bibliométrica

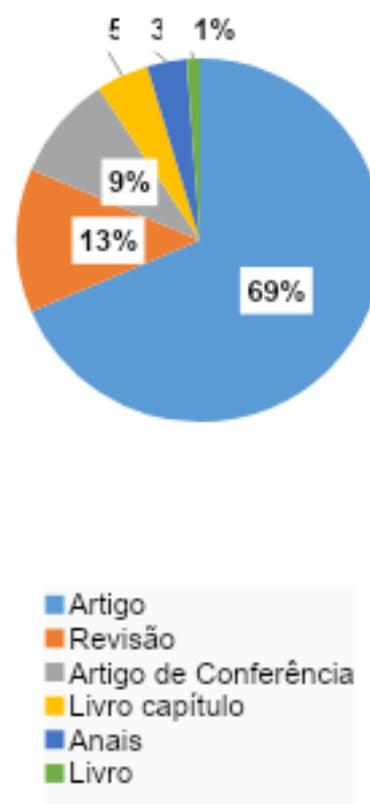
4.1.1 Tintas biocidas

A string restrita '*Building AND Paints AND (antimicrobial OR biocide OR antibacterial)*', com o filtro temporal (2005-2024), gerou um total de 198 resultados. Por fim, após a leitura dos títulos e resumos, e mesclagem para eliminação dos duplicados usando o RStudio, foram mantidas 86 obras com maior aderência ao tema de estudo, aptos para análise bibliométrica. Em um diagnóstico preliminar, verificam-se os dados mais relevantes, conforme descritos abaixo.

Tabela 5 - Informações gerais

Descrição	Resultados
Intervalo de tempo	2006: 2024
Fontes (revistas, livros, etc.)	65
Documentos	86
Taxa de crescimento anual%	3,93
Idade média do documento	8,05
Média de citações por documento	14,17
Referências	3417
TIPOS DE DOCUMENTOS	
Artigo	59
Revisão	11
Artigo de Conferência	8
Livro capítulo	4
Anais	3
Livro	1
AUTORES	
Autores	319
Co-autores por documento	4,53
Autores de documentos de autoria única	6
Documentos de autoria única	6
Co-autorias internacionais %	6,977
Palavras-chave do autor (DE)	286
Palavras-chave Plus (ID)	1026

Figura 13 - Tipos de documentos



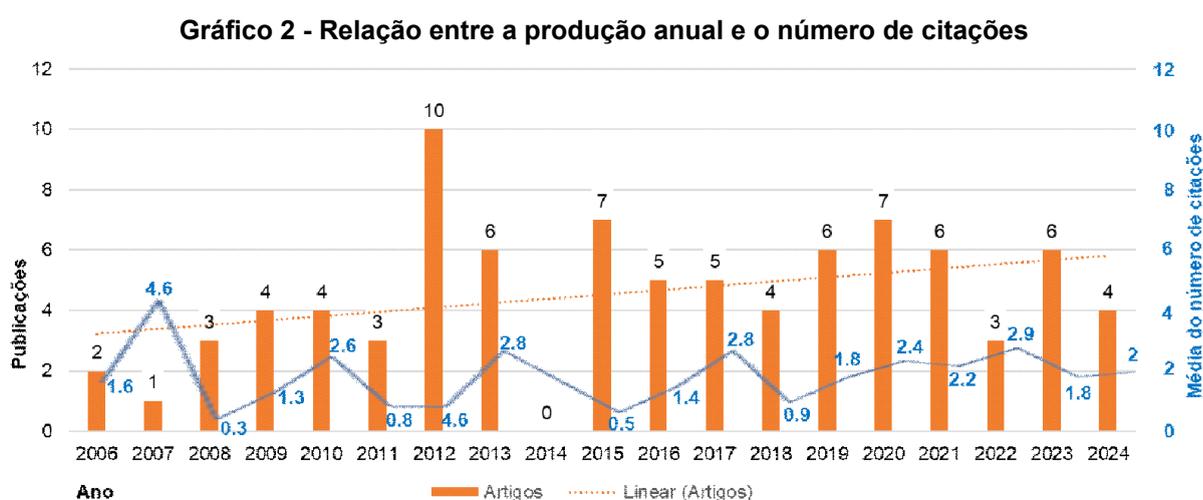
Nota: Síntese de dados obtidos através do programa RStudio, das informações adquiridas nas plataformas Scopus e Web of Science.

Fonte: O autor (2025).

A **Tabela 5** apresenta uma análise textual dos dados de forma detalhada quanto à distribuição dos documentos, destacando aspectos como o crescimento do número de publicações, a distribuição de autores e quantidade de documentos. Dos 86 documentos identificados nas duas bases de dados, 69% (59) são artigos de periódicos, 13% (11) são revisões e 9% (8) são artigos de conferências, enquanto as demais produções incluem anais, livros e capítulos de livros, como é visto na **Figura 13**.

A média de idade dos documentos é de 8 anos. Os primeiros documentos relevantes datam de 2006 (conforme demonstrado na **Tabela 5** e na **Figura 13**), considerando o intervalo temporal de 2005 a 2024. Nesse período, identificou-se um total de 319 autores envolvidos na pesquisa e publicação sobre o tema. Entre esses, apenas 6 documentos foram de autoria única, e 6,97% das publicações resultaram de colaborações internacionais, evidenciando uma significativa tendência à coautoria e cooperação global na área de estudo.

No **Gráfico 2**, são apresentados os dados de produção científica anual e o número de citações com base na procura feita no *WoS* e *Scopus*. O gráfico apresenta a evolução do número de artigos publicados por ano (barras laranjas) e a média do número de citações por artigo (linha azul), com dados entre 2006 e 2024. Também há uma linha de tendência linear para o número de artigos ao longo dos anos.

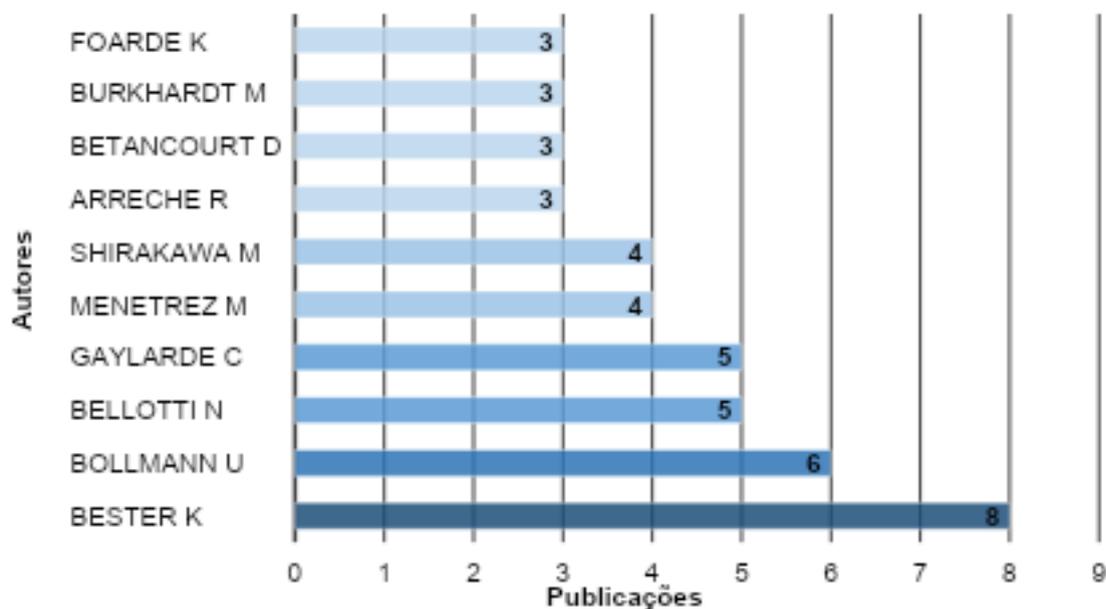


Nota: Evolução do número de publicações e o número total de citações entre 2006-2024.
Fonte: O autor (2025).

As primeiras publicações sobre o tema investigado foram encontradas a partir de 2006. Entre 2007 e 2011, houve uma produção média de três artigos por ano. A partir de 2011, observou-se um aumento no número de publicações, com um pico em 2012, quando foram publicados dez artigos. De 2015 a 2024, a produção se estabilizou em uma média de seis publicações anuais. Os dados ainda revelam uma tendência crescente nas pesquisas sobre o tema, evidenciada pela linha ascendente pontilhada, que indica um aumento constante no número de citações anuais em comparação com o número de publicações no mesmo período.

A tendência observada sugere um interesse crescente e maior relevância do tema na comunidade científica. Isso indica que o campo de estudo ainda não atingiu seu estágio de maturidade e, provavelmente, continuará a atrair um número significativo de pesquisas no futuro. O **Gráfico 3** apresenta o volume de produção por autor, destacando a contribuição de cada pesquisador para a área de estudo. As barras horizontais do gráfico indicam o número de publicações associadas a cada autor, com os valores exatos indicados à direita.

Apesar das oscilações anuais, observa-se que o número de publicações segue uma trajetória de crescimento ao longo do tempo. Além disso, a média de citações por artigo varia ao longo dos anos, o que sugere que determinados períodos foram marcados por publicações de maior impacto na produção científica, evidenciando a relevância das contribuições em momentos específicos.

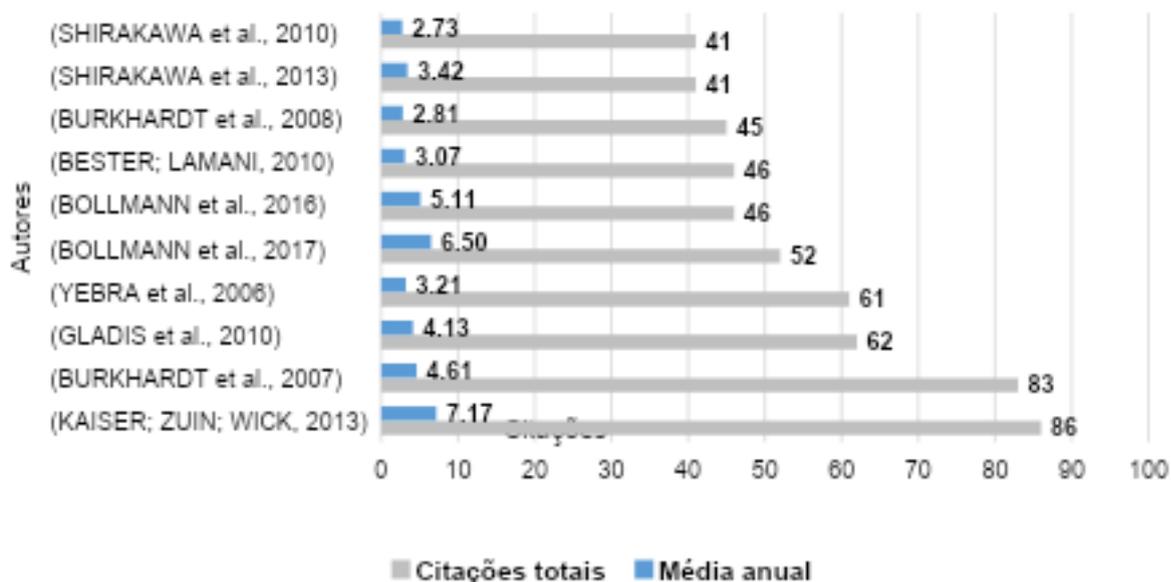
Gráfico 3 - Produção científica por autores

Fonte: O autor (2025).

Conforme o **Gráfico 3**, entre os 10 autores mais produtivos no tema de pesquisa, Bester se destaca com oito estudos publicados, seguido por Bollmann, que contribuiu com seis trabalhos. Gaylarde e Bellotti também são notáveis, cada um com cinco publicações. Menetrez e Shirakawa aparecem com quatro trabalhos, enquanto os demais autores na lista produziram três estudos cada.

Além da quantidade de publicações, é relevante considerar o impacto desses trabalhos, medido pelo número de citações que cada autor recebeu, o que reflete a influência e a relevância de suas pesquisas, conforme está apresentado no **Gráfico 4**. Esta apresenta as produções científicas mais citadas no período de análise, destacando estudos com variação de citações entre 41 e 86 vezes, com médias anuais de citações variando de 2,73% a 7,17%.

Gráfico 4 - Produção científica mais citadas

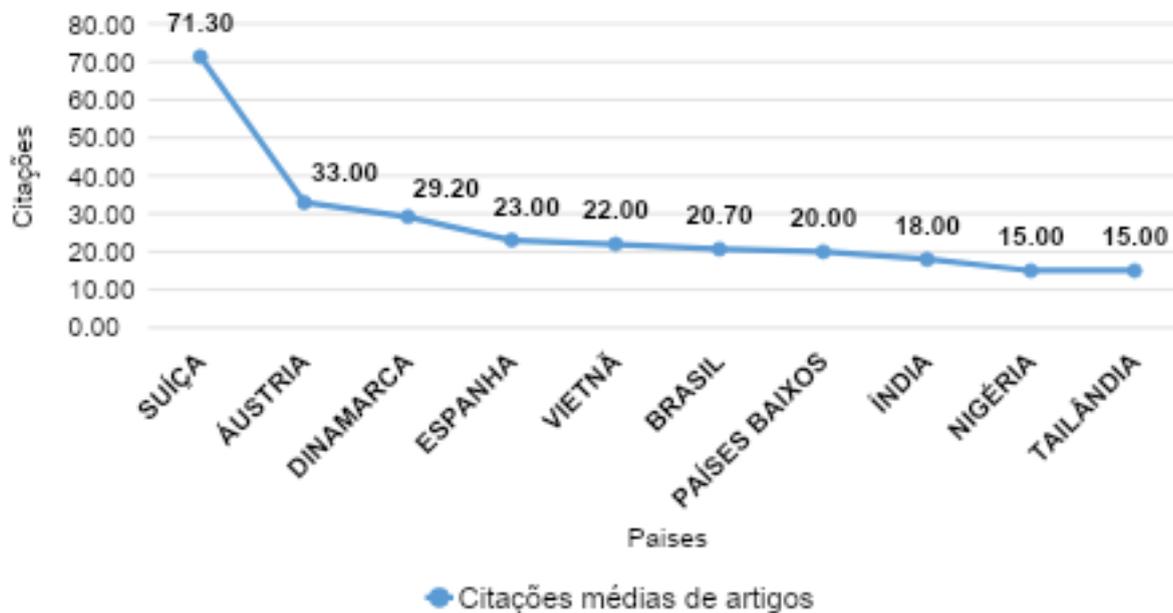


Fonte: O autor (2025).

Entre os trabalhos mais referenciados, destaca-se o artigo '*Is nanotechnology revolutionizing the paint and lacquer industry? A critical opinion*' (Kaiser et al., 2013), que é uma referência importante no campo das nanotecnologias, contando com 86 citações. Outro estudo notável é o de Burkhardt et al. (2007), intitulado '*Biocides used in building materials and their leaching behavior to sewer systems*', que trata da preocupação com a poluição das águas causada pelos biocidas utilizados em materiais de construção e seu comportamento de lixiviação, com 83 citações.

Entre os países com maior número de citações no período de 2016 a 2024, a Suíça se destaca, com uma média de 71,30 citações, indicando a alta qualidade e influência de suas pesquisas. Em segundo lugar, a Áustria registra uma média de 33 citações, seguida de perto pela Dinamarca, com uma média de 29,20 citações. Esses números refletem o impacto significativo e a relevância das contribuições desses países na área de estudo em questão. Conforme ilustrado no **Gráfico 5**, o Brasil, com uma média de 20,70 citações, apresenta uma contribuição considerável à produção científica, especialmente em comparação com outros países emergentes. Quando comparado com Índia (18,00), Nigéria e Tailândia (ambos com 15,00), o Brasil demonstra uma relevância crescente, o que pode indicar um aumento no reconhecimento internacional de suas pesquisas, particularmente em áreas específicas.

Gráfico 5 - Países citados



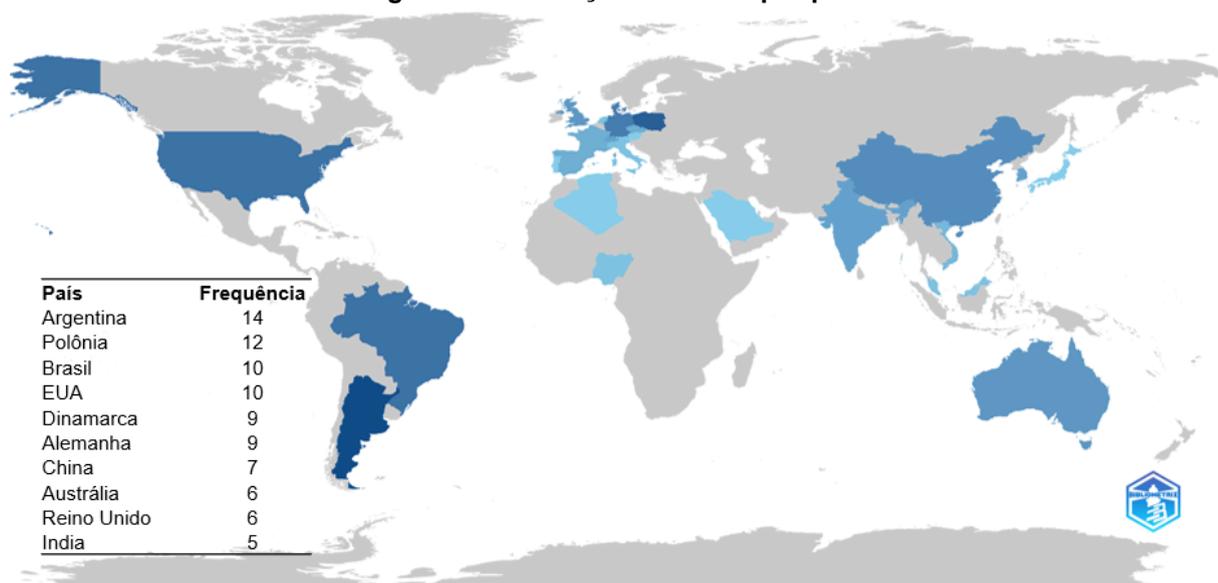
Fonte: O autor (2025).

Entre os trabalhos de produção brasileira citados, destacam-se os produzidos pela Escola Politécnica de São Paulo: '*Climate as the most important factor determining antifungal biocide performance in paint films*' (Shirakawa et al., 2010), estudando a eficácia dos biocidas na tinta que é reduzida pela lixiviação provocada pela chuva, o que permite a colonização microbiana e resulta em descoloração, especialmente em climas tropicais. Outro citado, pertencente ao mesmo grupo de pesquisa, é o '*Inhibition of Cladosporium growth on gypsum panels treated with nanosilver particles*' (Gaylarde et al., 2013), abordando o uso de partículas de nanop prata recentemente aceitas como um biocida eficaz, especialmente em aplicações clínicas para combater bactérias e vírus, já utilizadas em tintas internas. Em seus estudos, o uso em materiais de construção ainda não é comum, foram realizados testes de biodeterioração acelerada para avaliar o potencial das nanopartículas de prata na proteção de superfícies de painéis de gesso, contendo diferentes concentrações de nanop prata, sendo expostos ao fungo *Cladosporium sp.* e incubados em condições controladas.

A **Figura 14** mostra a produção dos países no período analisado. Os tons de azul escuro indicam os países com maior volume de produção científica. A Argentina lidera com 14 produções, seguida pela Polônia, com 12, e o Brasil e os EUA, que

empatam em terceiro lugar, com dez produções cada. A lista inclui os dez países mais produtivos. A soma totaliza mais que os 86 documentos analisados, pois muitos países colaboram em conjunto, o que pode aumentar o número de produções. No entanto, o que de fato ocorre é a valorização dos países produtivos, seja individualmente ou em conjunto, conforme a análise do Biblioshiny.

Figura 14 - Produção científica por país



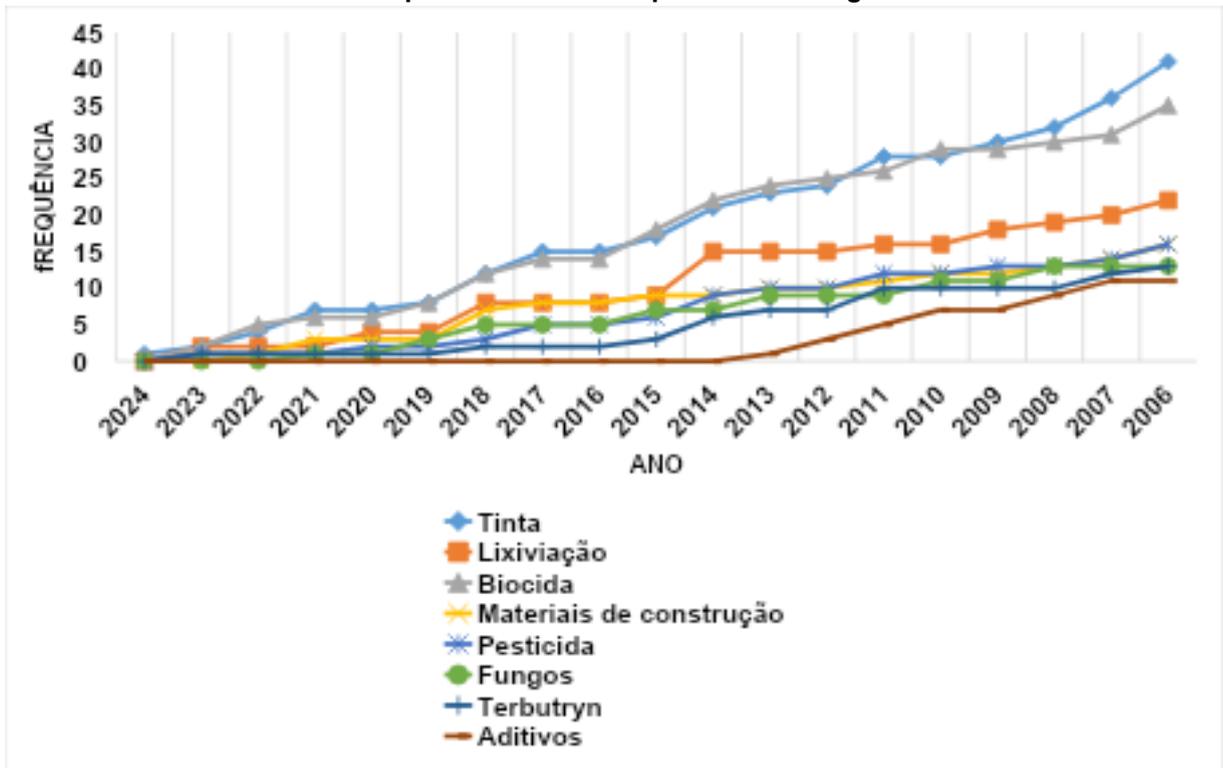
Fonte: O autor (2025).

O mapa temático de árvore de palavras, ilustrado na **Tabela 6**, fornece uma visão geral dos principais interesses de pesquisa que envolvem a produção de tintas com função biocida, permitindo identificar como as palavras estão conectadas em diferentes níveis de relevância ou predominância, sendo útil para entender a distribuição de temas ou tópicos dentro da pesquisa.

soluções inovadoras e sustentáveis para o setor da construção civil, como se percebe nos estudos de Gaylarde *et al.* (2013).

Desse grupo de palavras mais utilizadas, percebe-se que, a partir de 2011, intensifica-se o uso de termos como ‘tinta’, ‘lixiviação’ e ‘biocida’, refletindo um aumento de interesse por essa linha de pesquisa na última década, como se verifica no **Gráfico 6**. Isso possivelmente impulsionado pelo avanço de novas tecnologias relacionadas ao campo de nanomateriais, e por demandas de controle de infecção por agentes patógenos, uma vez que a construção civil pode ser uma grande aliada para aplicação de materiais com capacidade de resposta eficiente no sentido de controle.

Gráfico 6 - Frequência de uso das palavras ao longo dos anos

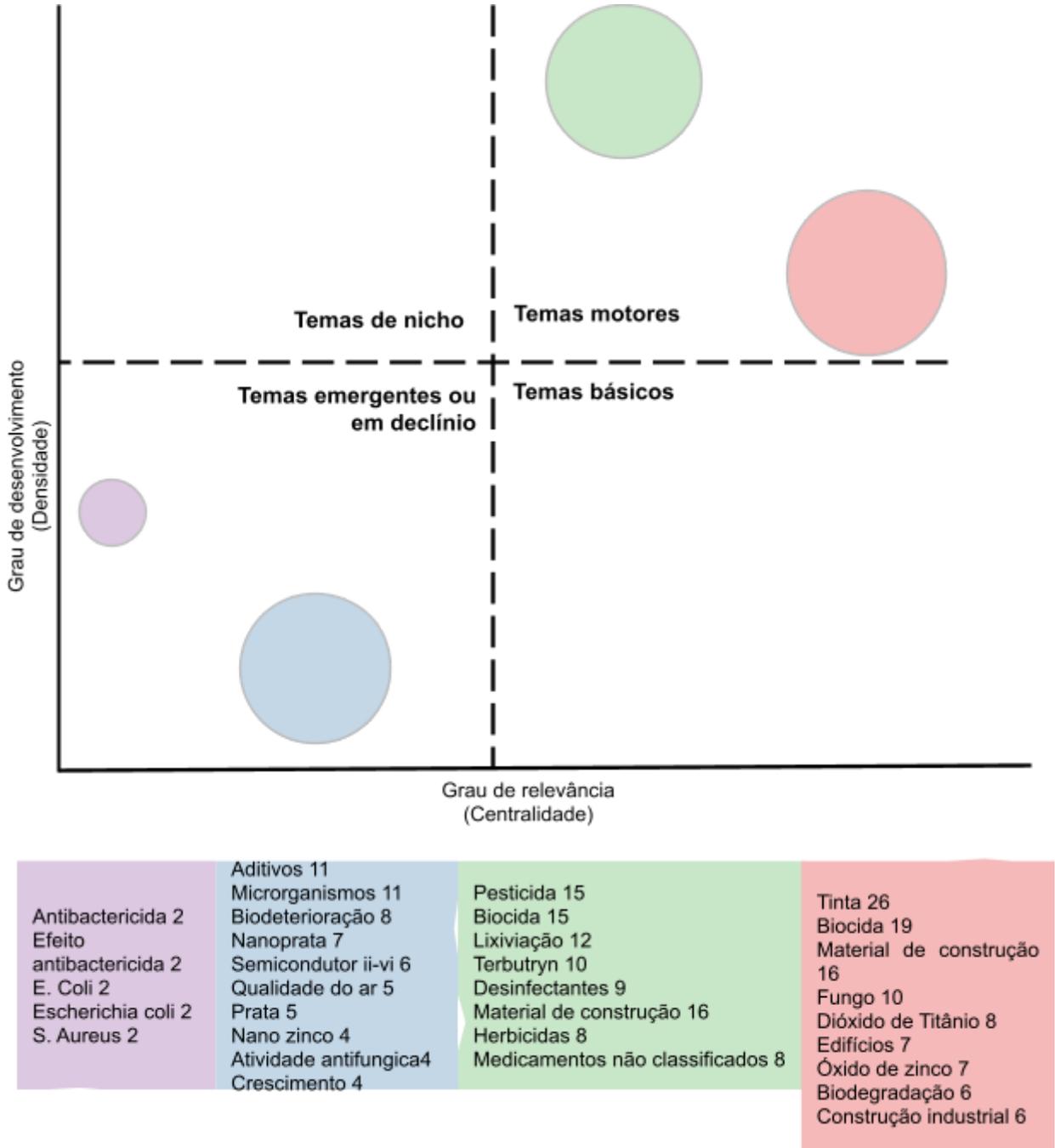


Fonte: Dados extraídos de Biblioshiny (2024).

No mapa, os clusters (temas de pesquisa constantes do **Quadro 14**) são estruturados e classificados de acordo com duas dimensões: centralidade, que delimita a importância de um tema no desenvolvimento do campo teórico; e densidade, que diz respeito à coesão interna das palavras que compõem um tema (Cobo *et al.*, 2011). No **Quadro 14**, o quadrante superior esquerdo abrange temas

muito especializados, de caráter periférico, que possuem relevância secundária para os pesquisadores (Cobo *et al.*, 2011).

Quadro 14 - Estrutura e classificação dos temas de pesquisa



Fonte: Dados extraídos de Biblioshiny (2024).

O quadrante inferior esquerdo é denominado marginal devido à sua posição periférica em relação ao eixo central do gráfico, indicando temas que, apesar de terem sido relativamente desenvolvidos, possuem menor relevância ou estão em

fase de emergência ou declínio no campo de pesquisa. Esses clusters abrangem tópicos que não são centrais para o avanço atual do campo, mas ainda podem ter importância, seja por seu caráter emergente ou por estarem gradualmente sendo abandonados.

No caso específico do cluster ‘antibactericida’, que trata de temas como ‘*Escherichia coli*’ e ‘*S. aureus*’, a investigação é considerada marginal por ser realizada de forma isolada e apresentar baixa integração com o campo predominante de revestimentos funcionais. Isso significa que, embora relevante, seu impacto no campo mais amplo é secundário, sendo menos prioritário em comparação a tópicos mais amplamente investigados. Assim, o termo ‘marginal’ reflete tanto a sua menor relevância quanto sua menor centralidade para os pesquisadores principais da área.

A relevância que temas como ‘aditivos’, ‘microrganismos’, ‘nanoprata’, ‘prata’, ‘nano zinco’ e ‘atividade antifúngica’ (próximos às linhas de centralidade e densidade), têm adquirido, nos últimos anos, indica seu caráter de ascensão, sendo considerados alternativas relevantes no campo dos revestimentos funcionais. O quadrante superior direito do **Quadro 14** abrange temas que são bem explorados e relevantes para a estruturação de um campo de pesquisa (Cobo *et al.*, 2011). Portanto, os clusters ‘pesticida’, ‘biocida’ e ‘lixiviação’, que possuem altas centralidade e densidade, são considerados os temas motores do campo dos revestimentos funcionais.

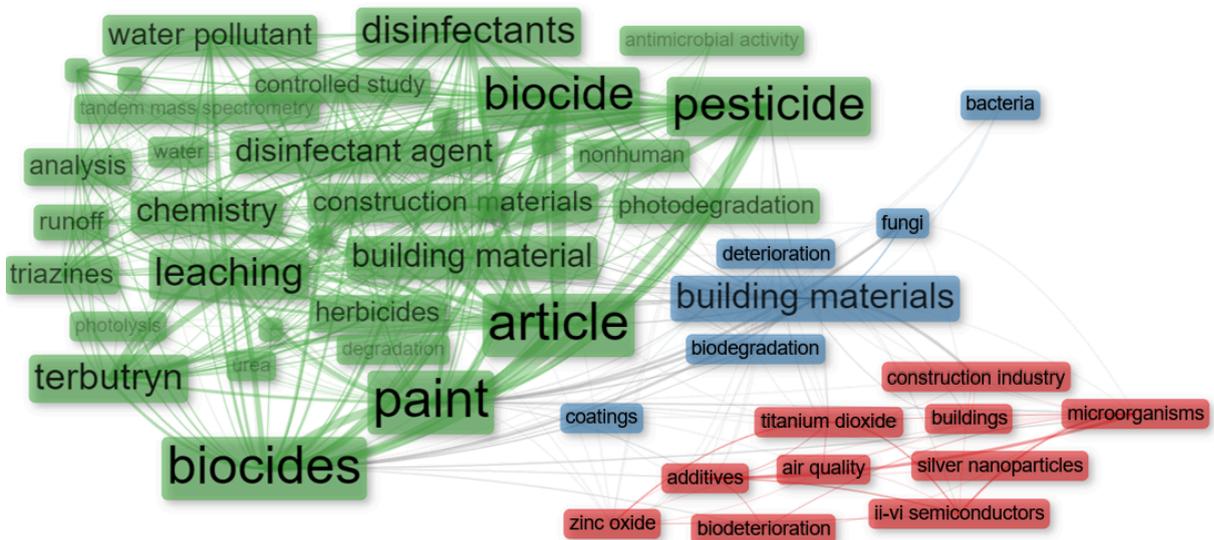
Por fim, o cluster ‘tinta’, ‘biocida’, ‘material de construção’, ‘fungo’, ‘dióxido de titânio’ e ‘material de construção’, são fundamentais para a pesquisa em revestimentos funcionais, e são amplamente estudados, devido à sua importância e aplicação prática no campo. Ainda no **Quadro 14**, no quadrante inferior direito, estão localizados os temas básicos, transversais, gerais e importantes para o referido campo.

Sobre a rede de co-ocorrência de palavras mencionadas por autores, o **Quadro 15** ilustra a intensidade das interações entre essas palavras e agrupamentos, formados com base na frequência de suas citações conjuntas. Em cada tema, as palavras-chave e suas interconexões configuram um gráfico de rede, denominado rede temática. Cada rede temática é identificada pelo nome da

palavra-chave mais significativa dentro do tema associado, geralmente aquela que possui maior centralidade.

Apresenta-se, portanto, uma rede de co-ocorrência de palavras-chave, onde o tamanho dos nós corresponde ao número de documentos associados a cada palavra-chave, e a espessura dos links entre os nós é proporcional ao índice de equivalência entre as palavras. Além dessa rede principal de temas e palavras-chave interconectados, uma segunda rede é construída, baseada nos documentos vinculados a cada rede temática, como, por exemplo, ‘paint – coatings – titanium dioxide’.

Quadro 15 - Rede de coocorrência

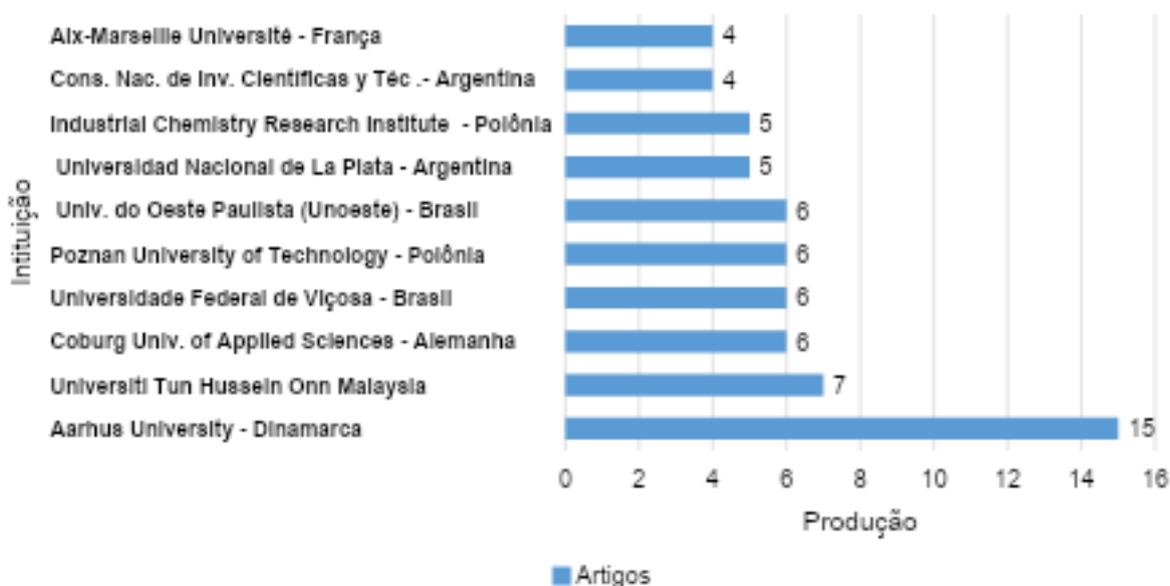


Fonte: Dados extraídos de Biblioshiny (2024).

Na segunda rede, documentos contendo as palavras-chave associadas a um eixo temático detectado são vinculados a ela. Portanto, dois tipos de documentos podem ser considerados: principais e secundários. Para ser classificado como ‘principal’, ele deve conter todas as palavras-chave que formam a rede temática. Por outro lado, um documento é classificado como ‘secundário’ se contiver apenas uma palavra-chave associada à rede temática. É importante destacar que tanto documentos principais quanto secundários podem pertencer a mais de uma rede temática, evidenciando a interconectividade e multidimensionalidade dos temas estudados.

O **Gráfico 7** apresenta as principais instituições de ensino e pesquisa que contribuíram para esta investigação, destacando a participação significativa de diversas universidades internacionais e nacionais. As contribuições variam entre seis e 15 publicações, refletindo a relevância e o impacto dessas instituições no desenvolvimento do estudo. As que mais contribuíram foram: em primeiro lugar, a Aarhus University (Dinamarca), com 15 produções; em segundo lugar, a Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, com sete publicações; e em terceiro lugar, com seis trabalhos cada, a Coburg University of Applied Sciences (Alemanha), Poznan University of Technology (Polônia), Universidade do Oeste Paulista (Unoeste, Brasil) e Universidade Federal de Viçosa (Brasil).

Gráfico 7 - Produção científica por instituição



Fonte: Dados extraídos de Biblioshiny (2024).

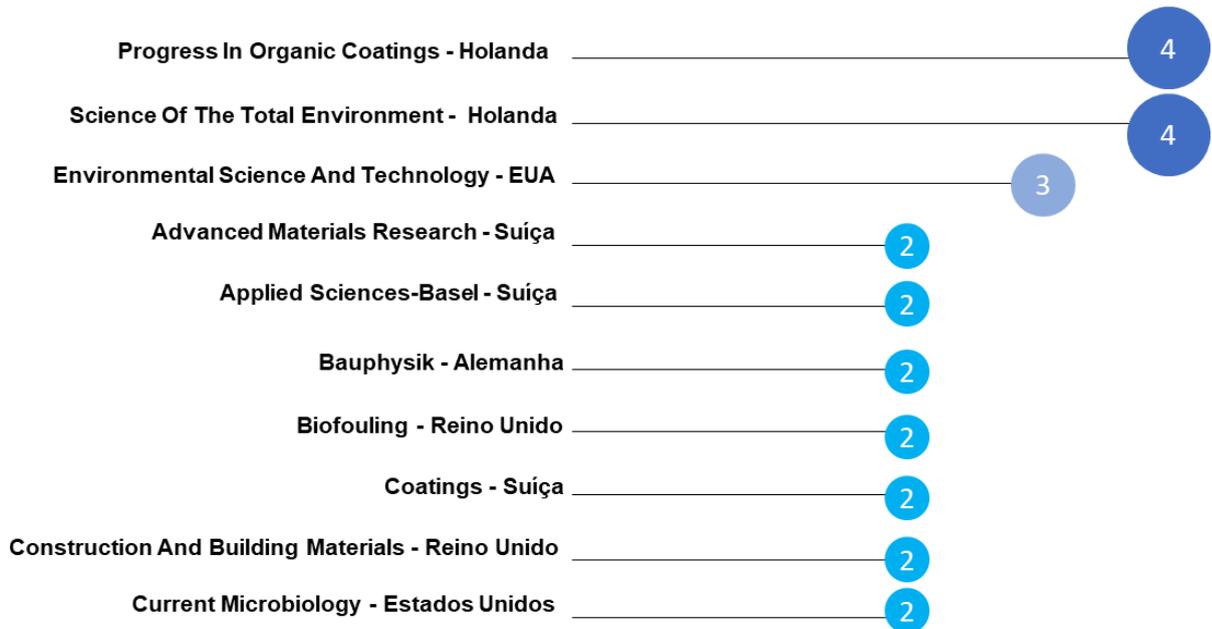
Já o **Quadro 16** ilustra os periódicos científicos mais relevantes que serviram como veículos de divulgação para as publicações analisadas. As 86 publicações consideradas foram divulgadas em 65 periódicos científicos, demonstrando o amplo interesse no tema.

Como é visto na figura citada, destacam-se: Progress In Organic Coatings e Science Of The Total Environment, como os mais influentes, com quatro publicações cada, sobre tintas biocidas, sugerindo sua relevância para pesquisas nessa área.

Environmental Science And Technology também recebe destaque, com três publicações, indicando seu papel na interseção entre ciência ambiental e tecnologia.

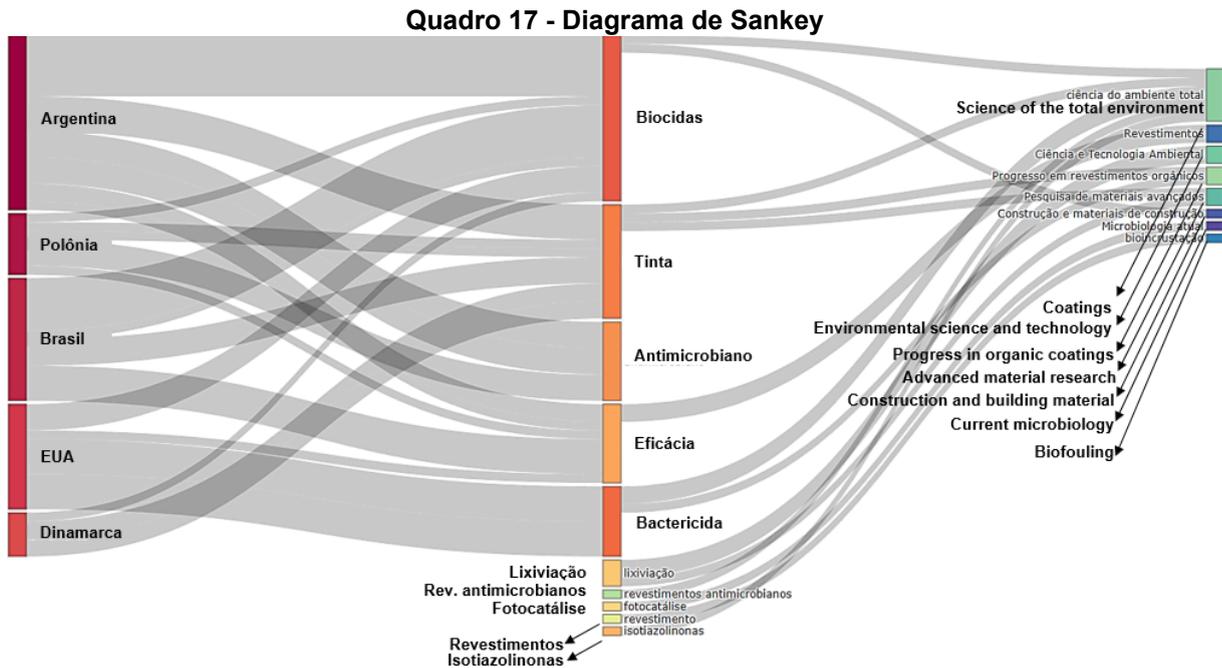
Os demais periódicos apresentam de uma a duas publicações, evidenciando uma concentração de conhecimento em poucos veículos chave, e uma dispersão de interesse entre outras publicações, o que sugere potencial interdisciplinaridade e inovação.

Quadro 16 - Periódicos científicos mais influentes do campo tintas biocidas



Fonte: Dados extraídos de Biblioshiny (2024).

O Diagrama de Sankey (**Quadro 17**), intitulado "Três Campos" na plataforma Biblioshiny, oferece uma análise visual detalhada das conexões entre países, palavras-chave e revistas mais relevantes na pesquisa sobre tintas biocidas.



Fonte: Dados extraídos de Biblioshiny (2024).

Essa ferramenta permite uma flexibilidade significativa para destacar diferentes tipos de informações, como autores, instituições, palavras-chave, títulos, referências e citações, conforme a análise desejada. No contexto deste estudo, o diagrama foi configurado para exibir as principais interações entre países, termos e revistas.

Ainda no **Quadro 17**, na coluna dos países (à esquerda), destacam-se Argentina, Polônia, Brasil, EUA e Dinamarca, que têm contribuído significativamente para as pesquisas sobre biocidas em tintas. O destaque do Brasil como um dos principais contribuintes reflete seu interesse no desenvolvimento de tecnologias sustentáveis e inovadoras.

A coluna central apresenta as palavras-chave, como 'biocidas', 'tinta', 'antimicrobiano', 'eficácia' e 'bactericida'. Essas palavras indicam os principais temas de pesquisa voltados ao desenvolvimento de tintas funcionais que combatem microrganismos, enfatizando soluções para revestimentos com propriedades antimicrobianas e resistência à lixiviação.

Na coluna das revistas (à direita), estão os periódicos mais importantes para a disseminação dessas pesquisas, incluindo Science of the Total Environment, Environmental Science and Technology e Progress in Organic Coatings. Esses

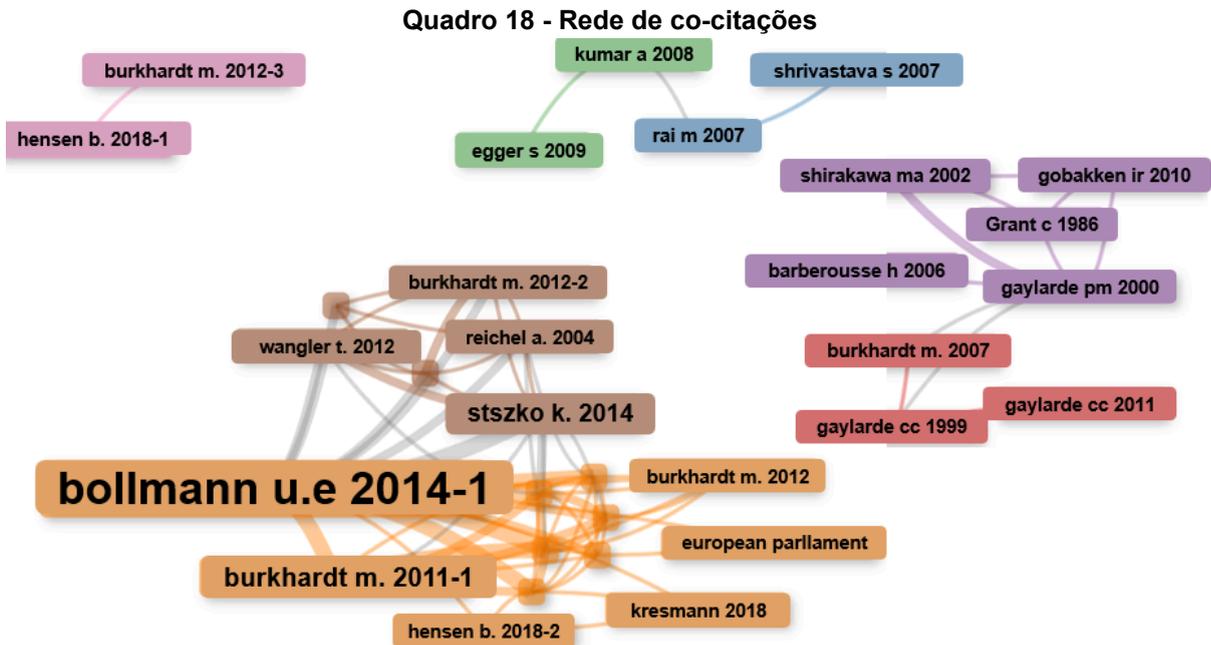
periódicos são reconhecidos por publicarem estudos sobre ciência ambiental e inovações em revestimentos funcionais.

Adiante, a análise do diagrama revela um fluxo claro de como os países, palavras-chave e revistas estão conectados. Brasil e EUA, por exemplo, são os principais contribuintes para publicações relacionadas a biocidas e tintas, com grande destaque para os periódicos *Science of the Total Environment* e *Environmental Science and Technology*. Além disso, as conexões entre palavras-chave como 'biocidas' e 'fotocatálise' indicam um foco nas tecnologias antimicrobianas e nos processos de lixiviação.

Em suma, o diagrama destaca as interações principais entre os países líderes na pesquisa, os tópicos mais relevantes e as revistas de maior impacto, oferecendo uma visão clara das tendências atuais sobre tintas biocidas e suas aplicações antimicrobianas. Na sequência, é apresentada a rede de co-citações, ou seja, artigos que citam uns aos outros, sendo alguns os principais destacados na imagem da rede.

O **Quadro 18** revela a separação de sete (07) clusters, identificados por diferentes cores, cada um representando um grupo de artigos inter-relacionados. Destacam-se, em alguns desses clusters, artigos principais, evidenciados pelo maior tamanho da fonte, o que indica a quantidade de citações que esses artigos recebem dos outros membros do cluster. Esse destaque visual permite inferir que os artigos com maior número de citações desempenham um papel central na construção do conhecimento dentro de suas respectivas áreas de pesquisa.

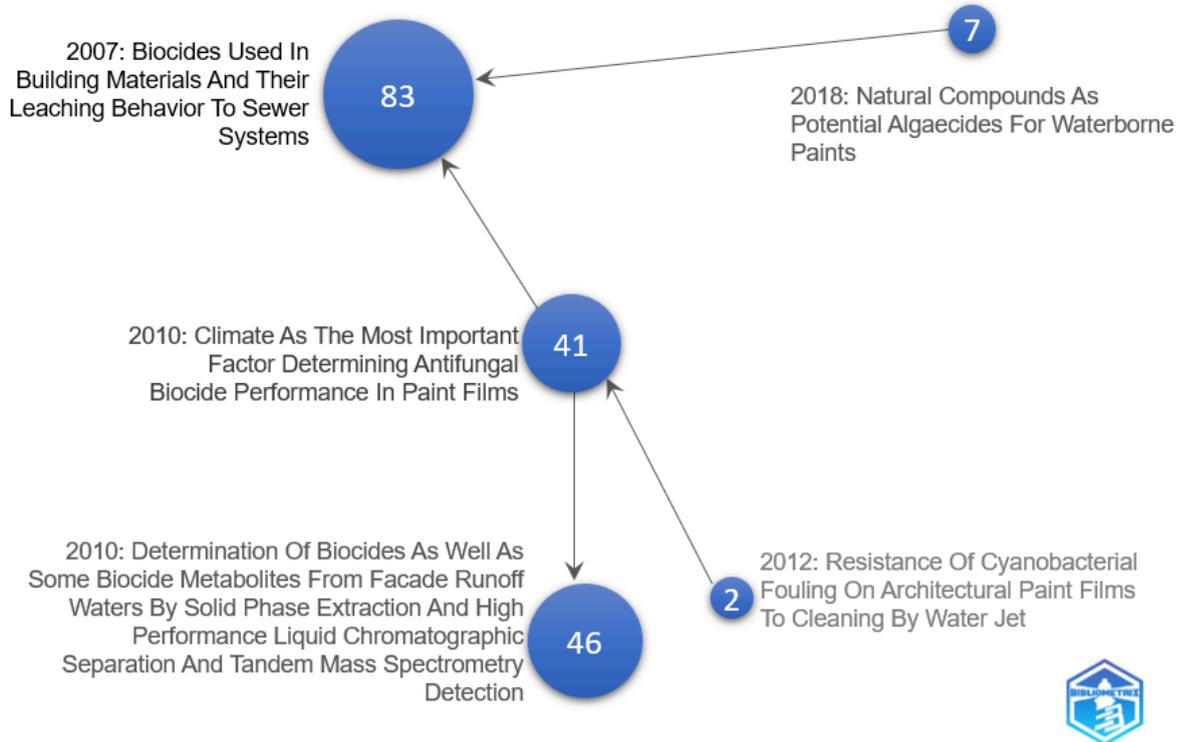
A observação das citações, alinhadas com os temas centrais, sugere que esses artigos não apenas seguem uma linha de pesquisa similar, mas também influenciam significativamente o desenvolvimento de estudos subsequentes. Essa análise das interconexões entre os artigos facilita a identificação de redes de pesquisa e de tendências emergentes dentro do campo estudado, oferecendo uma visão clara de como o conhecimento se estrutura e se expande em torno de temas chave.



Fonte: Dados extraídos de Biblioshiny (2024).

Os trabalhos de Bollmann (2014) são reconhecidos pelos estudos sobre biocidas da família terbutryn, amplamente utilizados em materiais de construção, como rebocos e tintas à base de resina polimérica. Suas pesquisas exploram os processos de lixiviação desses compostos e as implicações ambientais, com foco na poluição. Entre seus estudos mais citados estão: 'Biocide Runoff from Building Facades: Degradation Kinetics in Soil' e 'Leaching of Terbutryn and Its Photodegradation Products from Artificial Walls under Natural Weather Conditions' (Bollmann *et al.*, 2016; 2017), tornando-se referências fundamentais sobre o tema.

Além disso, o **Quadro 19**, complementando o **Quadro 18**, mostra a rede histórica de citações, destacando as relações temporais e temáticas entre os estudos. Essa análise facilita a visualização das tendências de pesquisa e das influências mútuas entre os trabalhos ao longo do tempo, proporcionando uma compreensão mais profunda do desenvolvimento acadêmico na área.

Quadro 19 - Histograma de histórico de citações

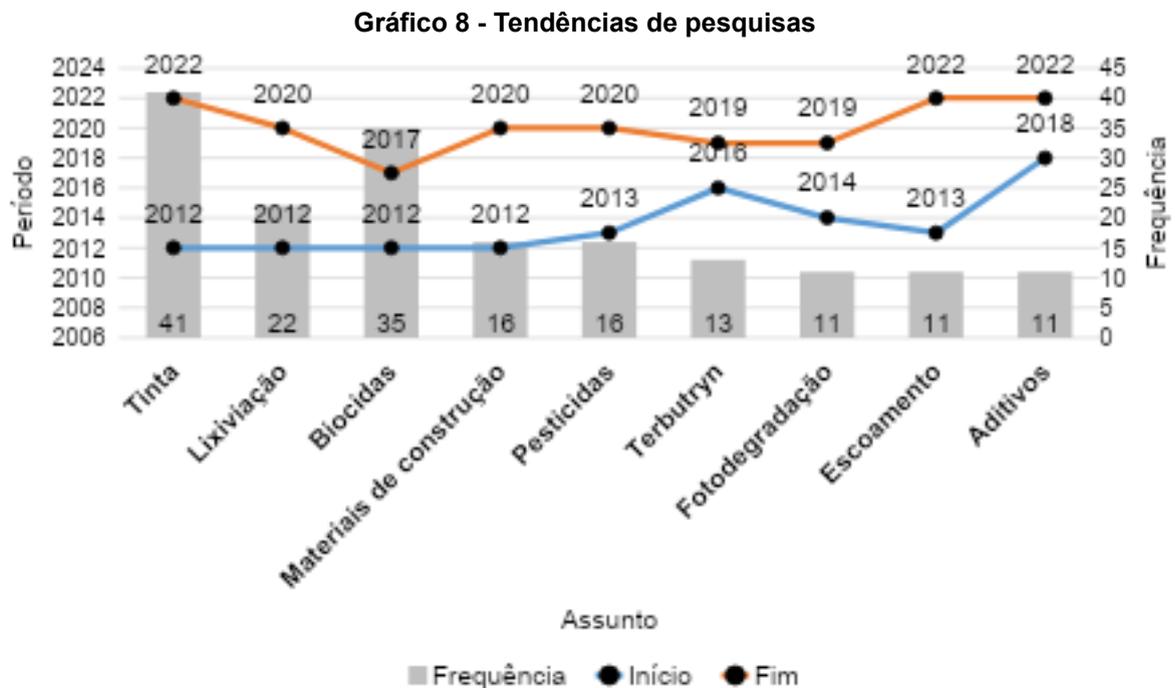
Fonte: Dados extraídos de Biblioshiny (2024).

Por conseguinte, o **Quadro 19** apresenta um histórico de citações, onde o tamanho das esferas reflete o número de vezes que cada artigo foi citado, mapeando temporalmente a origem de alguns artigos recentes, e mostrando suas inter-relações. Pode-se identificar artigos clássicos que são frequentemente abordados indiretamente por estudos subsequentes. O artigo intitulado 'Biocides used in building materials and their leaching behavior to sewer systems' (Burkhardt *et al.*, 2007), examina a poluição difusa causada por biocidas utilizados em áreas urbanas, com foco nas fontes e caminhos que levam esses compostos a poluir a água de escoamento superficial. Os principais focos de poluição vêm de materiais de construção, como fachadas (tintas, rebocos) e membranas de vedação de telhados.

O referido estudo identificou concentrações significativas de substâncias como terbutryn, carbendazim e mecoprop, em um sistema de esgoto urbano, excedendo o padrão de qualidade de água da Suíça (0,1 µg/L), mesmo após a primeira descarga. Experimentos em laboratório revelaram que as concentrações de mecoprop, um agente de proteção de raízes em folhas de betume, variam

amplamente, dependendo da composição do produto. Os pesquisadores sugerem que o uso de produtos otimizados pode ser a solução mais eficiente e sustentável para reduzir o impacto ambiental desses biocidas. O estudo faz parte do projeto URBIC, que propõe medidas para limitar o impacto dos biocidas na água superficial e subterrânea.

Sobre a estrutura do **Quadro 19**, ainda é possível observar os traços que ligam cada artigo, indicando as conexões entre eles e destacando os que seguiram as mesmas linhas de pesquisa de seus precursores. Esse mapeamento facilita a compreensão da evolução do campo de estudo e das influências acadêmicas ao longo do tempo. Já o **Gráfico 8** apresenta termos listados como tópicos de tendências para pesquisas na análise bibliométrica realizada pelo Biblioshiny.



Fonte: Dados extraídos de Biblioshiny (2024).

A figura revela a frequência com que esses termos aparecem ao longo dos anos nos documentos analisados, permitindo observar os períodos de maior incidência e as possíveis razões por detrás dessas tendências. O termo 'tinta' surge em primeiro lugar, com maior regularidade entre os anos de 2012 e 2022, destacando-se como um tema central na literatura técnica e científica, possivelmente impulsionado pelo desenvolvimento contínuo de novas formulações, bem como pela crescente demanda por produtos mais eficientes e duráveis.

O termo 'biocidas' aparece em segundo lugar, com 35 apontamentos entre 2012 e 2017, refletindo um volume significativo de pesquisas sobre agentes com essas propriedades. Esse período coincide com uma fase intensa de estudos sobre biocidas, possivelmente motivada pela necessidade de controlar a proliferação de microrganismos em tintas e revestimentos, sem comprometer a segurança humana e ambiental. A queda subsequente na frequência desse termo pode indicar um amadurecimento das soluções encontradas, ou uma mudança no foco das pesquisas para outras áreas correlatas.

Em terceiro, 'lixiviação' aparece com 22 sinalizações entre 2012 e 2020, o que indica uma preocupação crescente com o meio ambiente, especialmente no contexto de descarte e impacto ambiental dos resíduos de tintas. Essa frequência sugere um aumento nas pesquisas voltadas para a mitigação dos efeitos adversos da lixiviação de componentes químicos, como as pesquisas feitas pela equipe de Burkhardt, Bollmann e Shirakawa - citados anteriormente -, entre outros, refletindo uma consciência maior sobre a necessidade de se evitar a solubilização de constituintes potencialmente tóxicos e, assim, reduzir a contaminação do solo e dos recursos hídricos.

Além disso, a análise mostra a evolução das preocupações ambientais e de saúde pública, revelando uma tendência de estudos focados em desenvolver soluções sustentáveis e seguras na área de tintas e revestimentos. O crescente interesse por termos como 'lixiviação' e 'biocida' sugere que a comunidade científica tem direcionado seus esforços para enfrentar os desafios impostos pela regulamentação ambiental mais rígida e pela demanda por produtos ecologicamente corretos. Essa visão detalhada permite identificar as áreas de maior foco e desenvolvimento ao longo do tempo, destacando a importância de acompanhar essas tendências para antecipar futuras necessidades do mercado e da pesquisa.

4.1.2 Tungstato de prata

Nesta pesquisa, a busca utilizando a string (restrita) 'Silver AND Tungstate AND (antimicrobial OR biocide OR antibacterial)' resultou em 59 documentos, dos quais 22 foram extraídos da base de dados *Scopus* e 29 da *Web of Science*. Após a mesclagem dos resultados no RStudio, foram identificados e eliminados 11 registros duplicados, restando 40 documentos para a triagem de títulos e resumos. Triagem

concluída, 20 documentos que apresentavam uma relação direta com o tema da pesquisa foram considerados aptos para a análise bibliométrica. Os dados mais relevantes obtidos nesta etapa preliminar estão descritos nas **Tabelas 7 e 8**, a seguir.

Tabela 7 - Tungstato de Prata, informações gerais

Intervalo de tempo	Fontes	Documentos	Taxa de crescimento anual
2014:2024	16	20	0 %
Autores	Autores de docs. autoria única	Coautoria internacional	Coautores por documentos
93	0	35%	8.7
Palavras chaves	Referências	Idade média do documento	Média de citações por docs.
51	1253	3.9	26.2

Fonte: Dados extraídos de Biblioshiny (2024).

Os resultados bibliométricos sobre o uso do tungstato de prata na literatura científica revelam várias tendências importantes. A análise indica que toda a produção científica consiste em artigos de estudos específicos. Isso sugere que a pesquisa sobre tungstato de prata está mais focada na exploração de novas descobertas e aplicações específicas, em vez de resumir e sintetizar o conhecimento já existente.

Os primeiros documentos relevantes são datados de 2014 (não foi aplicado filtro temporal nas buscas). Observa-se um volume total de 93 autores pesquisando e escrevendo sobre o tema, nenhum trabalho foi classificado de autoria solo, 8,7 são documentos de coautoria, valor que indica a média do número de co-autores por cada documento analisado. A interpretação é que esse valor expressa diretamente quantos co-autores estiveram envolvidos, em média, na produção dos documentos analisados (o que pode refletir o nível de colaboração em determinada área científica) e 35% das publicações possuem coautoria internacional. Palavras-chaves citadas pelos autores somam um total de 51 termos ou expressões e 298 são 'palavras-chave plus', classificadas pelo Biblioshiny.

Tabela 8 - Tungstato de Prata, informações gerais

Descrição	Resultados
Período de tempo	2014:2024
Fontes (Revistas, Livros, etc.)	16
Documentos	20
Taxa de Crescimento Anual %	0
Idade média dos documentos	3,9
Média de citações por documento	26,2
Referências	1253
CONTEÚDO DO DOCUMENTO	
Palavras-chave Plus (ID)	298
Palavras-chave do autor (DE)	51
AUTORES	
Autores	93
Autores de documentos de autor único	0
COLABORAÇÃO DE AUTORES	
Documentos com um único autor	0
Co-autores por documento	8,7
Co-autorias internacionais %	35
TIPOS DE DOCUMENTOS	
Artigo	20

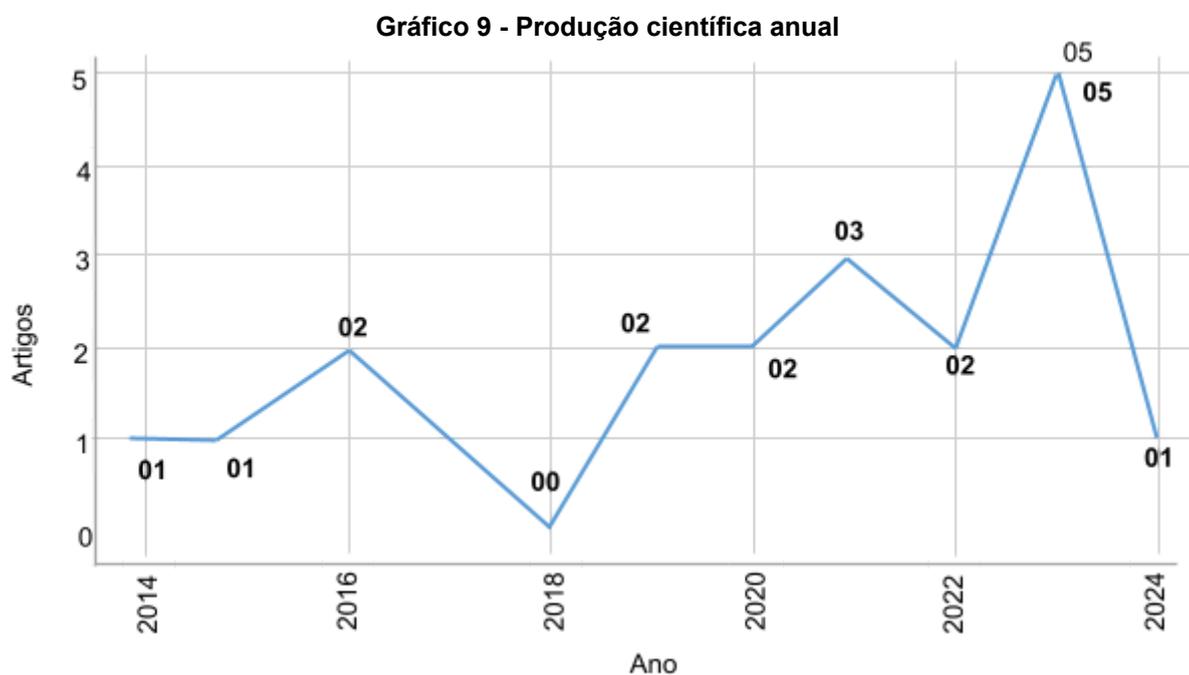
Nota: Síntese de dados obtidos através do programa RStudio. *Intervalo de tempo citado não entra como filtro de busca, mas como primeiros documentos encontrados a partir de 2014.

Fonte: O autor (2025).

As palavras-chave plus são termos ou frases adicionais geradas automaticamente a partir das referências citadas pelos artigos analisados. Diferentemente das palavras-chave fornecidas pelos autores, essas são extraídas com base nas palavras mais frequentes presentes nos títulos das referências bibliográficas, oferecendo uma perspectiva complementar ao conteúdo.

Por serem geradas automaticamente, as palavras-chave plus têm a capacidade de capturar tendências emergentes e tópicos que não foram explicitamente mencionados pelos autores, ampliando o escopo da análise bibliométrica. Essas palavras-chave fornecem uma visão mais abrangente dos temas abordados na literatura científica, enriquecendo as possibilidades de identificação de padrões e conexões dentro de um campo de estudo.

Ademais, o **Gráfico 9** apresenta a evolução das publicações sobre tungstato de prata no contexto da pesquisa, destacando o marco inicial, em 2014, com o primeiro estudo relevante que atende aos critérios de busca.



Fonte: Dados extraídos de Biblioshiny (2024).

Conforme se analisa no **Gráfico 9**, as primeiras publicações envolvendo o tungstato de prata, no contexto desta pesquisa, foram registradas a partir de 2014. O primeiro trabalho que atendeu aos critérios de busca é de autoria de Valéria M. Longo; Camila C. De Foggi; Mateus M. Ferrer; Amanda F. Gouveia; Rafaela S. André; Waldir Avansi; Carlos E. Vergani; Ana L Machado; Juan Andrés; Laécio S. Cavalcante; Antonio C. Hernandez; e Elson Longo. Publicado em 2014, tem a expressão 'agente microbial' em seu resumo, e é intitulado como: '*Potentiated Electron Transference in α -Ag₂WO₄ Microcrystals with Ag Nanofilaments as Microbial Agent*'.

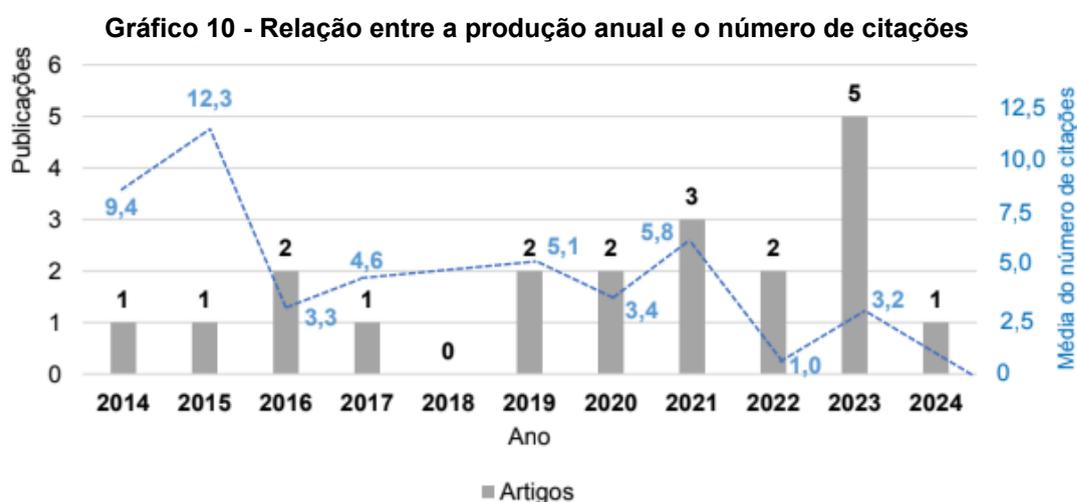
O estudo de Longo *et al.* (2014) propõe uma estrutura para entender o efeito antimicrobiano de microcristais de α -Ag₂WO₄, sintetizados por dois métodos diferentes no combate a células de *Staphylococcus aureus* resistentes à metilicina (MRSA). Comparando a eficiência de microcristais irradiados e não irradiados, o trabalho mostra que os irradiados são mais eficazes. Além disso, inclui a

caracterização das amostras e cálculos teóricos para explicar os mecanismos antimicrobianos envolvidos.

Observa-se um crescimento inicial, em 2014 e 2015, com a produção de um artigo por ano. Em 2016, houve um aumento para dois artigos, seguido por uma queda acentuada em 2017/2018, sem nenhuma produção registrada. Nos anos de 2019 e 2020, a produção manteve-se constante com dois artigos por ano. Em 2021, houve um aumento para três artigos, enquanto, em 2022, a produção caiu novamente para dois artigos.

O ano de 2023 apresentou um acréscimo substancial de cinco artigos publicados, o maior no período analisado, indicando um interesse especial no tema, sobretudo devido às propriedades antimicrobianas do tungstato de prata no período pós-covid-19. No ano de 2024, apenas uma publicação foi registrada até o momento final desta análise, com a expectativa de que mais artigos sejam publicados até o fim do ano.

A produção de artigos sobre tungstato de prata tem apresentado variações significativas, com períodos de crescimento, queda e estabilidade. O pico em 2023 pode indicar um aumento temporário de interesse ou descobertas importantes, refletindo tendências de pesquisa, financiamento e avanços tecnológicos relacionados ao tungstato de prata. A seguir, o **Gráfico 10** mostra as flutuações na média de citações anuais dos estudos sobre o tema ao longo dos anos, o que denota períodos de maior e menor impacto das publicações na área.



Fonte: Dados extraídos de Biblioshiny (2024).

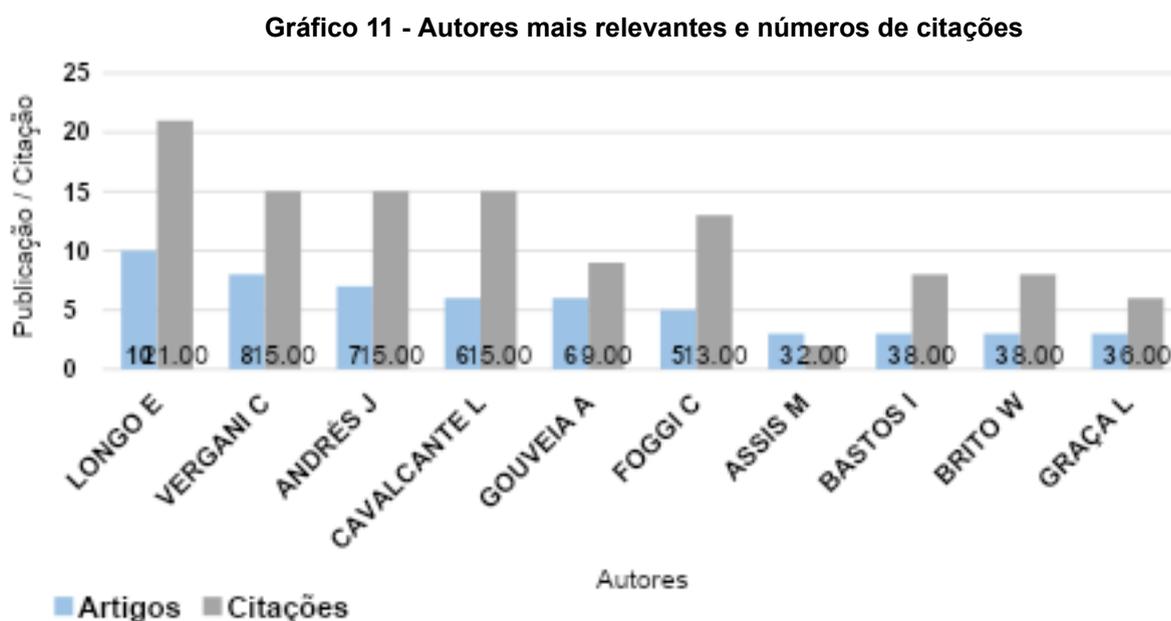
Analisando o **Gráfico 10**, percebem-se variações significativas na média de citações anuais dos estudos sobre tungstato de prata. Observa-se a evolução da produção de artigos (barras cinzas) e da média de citações por ano (linha azul) entre 2014 e 2024. Em 2014, a média foi de 9,4, alcançando um pico em 2015, com 12,3 citações, maior valor observado. No Biblioshiny, a métrica de citações exibida em gráficos como o do exemplo em análise, refere-se à média de citações por artigo para um determinado período de tempo (geralmente por ano). Para calcular essa métrica, o software soma o número total de citações que os artigos publicados em um determinado ano receberam e divide esse valor pelo número de artigos publicados no mesmo ano. Essa métrica fornece uma ideia da visibilidade e do impacto científico do material publicado em cada ano, ajudando a identificar quais períodos geraram publicações com maior repercussão.

A produção de artigos é relativamente estável entre 2014 e 2017, com um por ano. No entanto, observa-se um aumento significativo em 2019, 2021 e 2023, com um pico de cinco artigos publicados em 2023. Em 2018, não houve publicações, o que sugere uma pausa ou uma redução significativa na produção científica. A média de citações por artigo flutua consideravelmente ao longo dos anos. Em 2015, o valor mais alto de média de citações é registrado (12,3), indicando que os artigos publicados nesse ano receberam maior visibilidade ou relevância no campo. Em 2019 e 2020, também houve uma média de citações relativamente alta (5,1 e 5,8, respectivamente), o que sugere que os publicados nesses anos também tiveram um impacto considerável.

O valor de 1,0 em 2022 indica que, embora dois artigos tenham sido publicados, eles tiveram uma média de citações baixa até o momento. Há anos em que um número relativamente pequeno de publicações resultou em uma alta média de citações, como em 2015. Isso indica que, mesmo com uma produção menor, o impacto científico dos artigos foi elevado. No entanto, o aumento no número de publicações nem sempre corresponde a uma alta média de citações. Por exemplo, em 2023, apesar do número elevado de 5 artigos, a média de citações foi de 3,2, o que indica que, embora haja mais publicações, o impacto delas ainda não é tão elevado.

O **Gráfico 10** sugere que, ao longo dos anos, houve variações tanto na quantidade de publicados quanto no impacto desses artigos, medido pelo número de citações. O aumento da produção em 2023 pode indicar um período de maior atividade acadêmica, mas a média de citações relativamente baixa sugere que eles ainda precisam ganhar mais relevância no campo. Anos como 2015 e 2019 destacam-se pela alta média de citações, mesmo com um número moderado de publicações, sugerindo que os trabalhos desses períodos tiveram maior visibilidade e impacto na comunidade científica.

A partir do **Gráfico 11**, pode-se inferir sobre os principais autores na pesquisa relacionados ao tungstato de prata, mostrando aqueles com maior número de publicações e citações.



Fonte: Dados extraídos de Biblioshiny (2025).

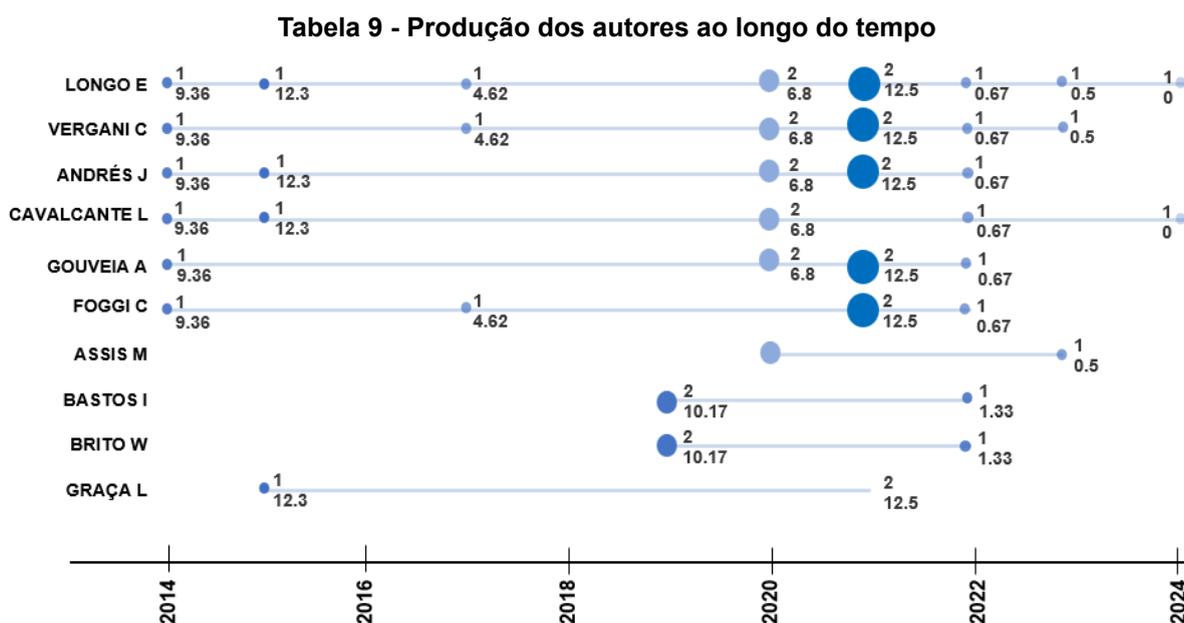
Dentre os 93 autores citados, dez são os que se destacaram pela produção. O autor com o maior número encontrado de artigos é Longo, com 10 documentos, equivalente a 10,75% dos trabalhos produzidos, sendo o primeiro publicado em 2014 e o último em 2024, mediante um volume de 21 citações ao longo do período analisado, como mostra o **Gráfico 11**.

Em segundo lugar, com oito produções aparece Vergani, com um total de 8,60% das publicações realizadas. Seu primeiro trabalho publicado foi em 2014 e o último em 2023, com 15 citações ao longo do período. Com relação à produção dos

autores identificados, 50 (53,76%) publicaram apenas um artigo, enquanto o pesquisador mais produtivo, anteriormente citado, foi responsável por dez artigos.

Em termos de produtividade científica, destacam-se os pesquisadores Elson Longo, Carlos Vergani e Juan Andrés, por desenvolverem 25 trabalhos dentro do período estabelecido para a coleta dos dados. Em relação ao total de citações, Elson Longo e Carlos Vergani são os dois pesquisadores mais influentes do campo, com a marca de 36 citações.

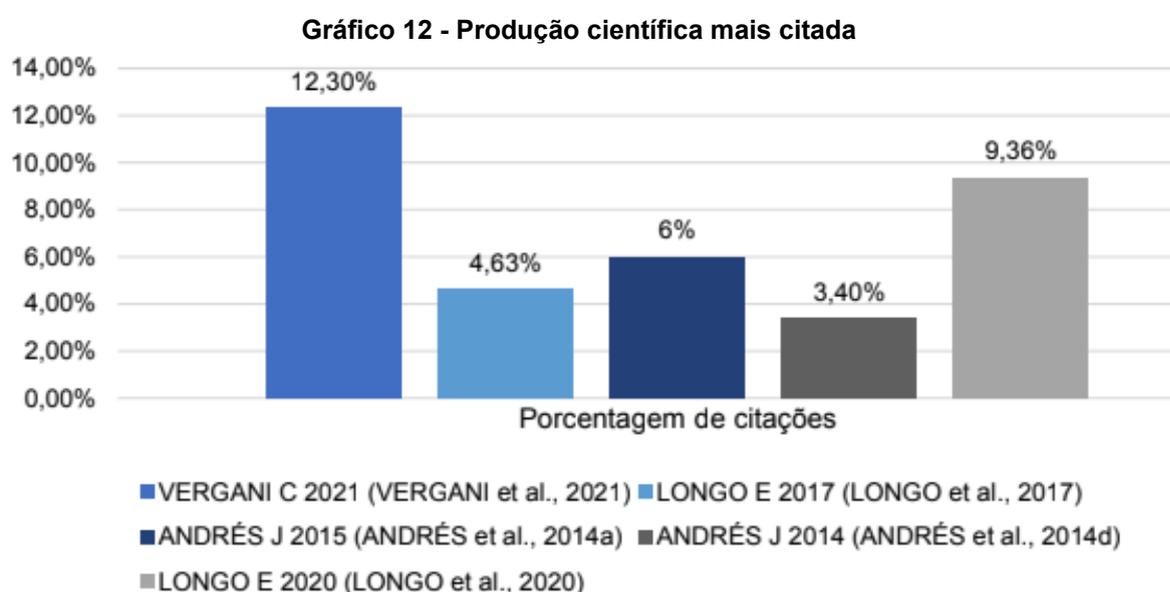
A **Tabela 9** exibe o fluxo de publicação dos autores mais produtivos. O tamanho dos círculos representa a quantidade de artigos, enquanto a intensidade da cor azul reflete o impacto da pesquisa em termos de número de citações. Nesse sentido, percebe-se que há uma concentração de produção evidenciada a partir de 2020.



Fonte: Dados extraídos de Biblioshiny (2024).

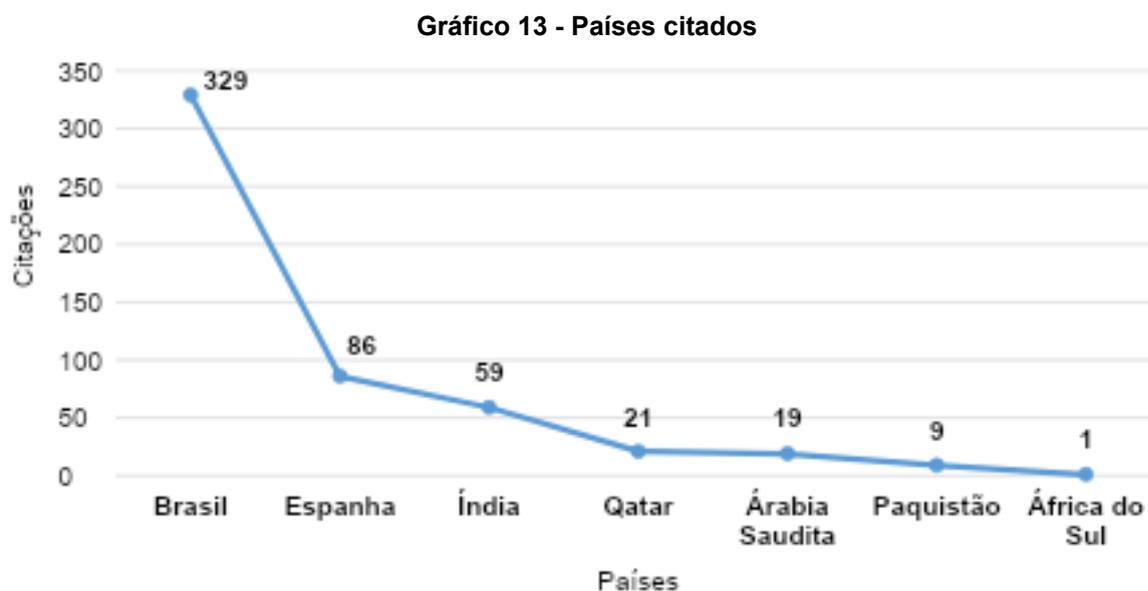
Os trabalhos mais recentes são de 2021, de Longo, Vergani, Andrés, Gouveia e Foggi, sendo amplamente citados (cor azul mais intensa). Todos são coautores do trabalho intitulado '*Selective Synthesis of α -, β -, and γ - Ag_2WO_4 Polymorphs: Promising Platforms for Photocatalytic and Antibacterial Materials*', cuja ideia central é a investigação dos polimorfos de tungstato de prata (Ag_2WO_4) com foco em propriedades estruturais e eletrônicas, além de suas atividades fotocatalítica e antibacteriana.

Com relação às produções científicas mais citadas, o **Gráfico 12**, mostra estudos que possuem uma variação dos percentuais de documentos com mais citações. Dentre os trabalhos mais referenciados, o artigo ‘*Selective Synthesis of α -, β -, and γ - Ag_2WO_4 Polymorphs: Promising Platforms for Photocatalytic and Antibacterial Materials*’ (Vergani et al., 2021) é uma publicação muito lembrada, seguido do trabalho de Longo et al. (2017) intitulado ‘*Tuning the Morphological, Optical, and Antimicrobial Properties of α - Ag_2WO_4 Microcrystals Using Different Solvents*’, cujo tema central é a síntese e avaliação da atividade antimicrobiana de microcristais de α - Ag_2WO_4 .



Fonte: Dados extraídos de Biblioshiny (2024).

Por meio do **Gráfico 13**, visualizam-se os países com maior produção científica de pesquisas sobre tungstato de prata entre 2014 e 2024.

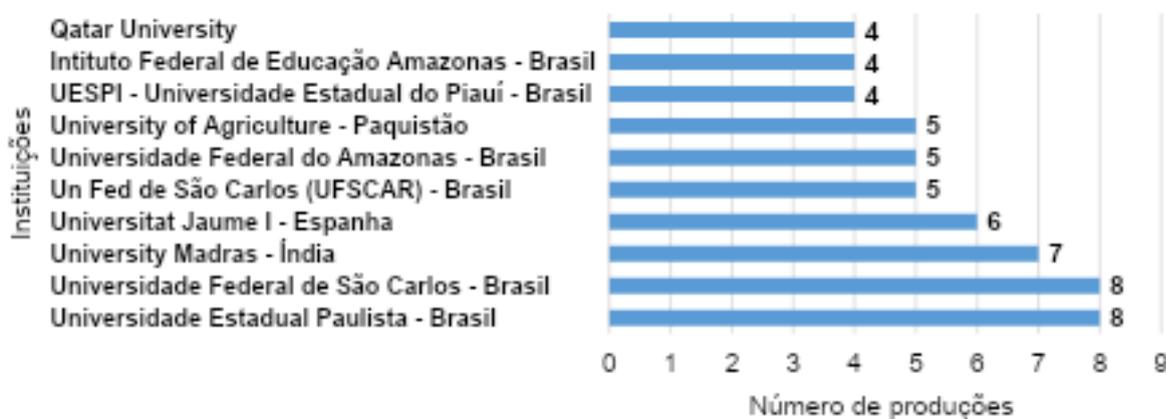


Fonte: Dados extraídos de Biblioshiny (2024).

Entre os países com maior produção citada no período observado, destacam-se: Brasil, com uma média de 329 citações; seguido da Espanha, com 86; e a Índia, com 59, em terceiro lugar. A análise permite constatar que o Brasil tem sido referência em pesquisa sobre tungstato de prata.

Além disso, a presença de países como Qatar e Arábia Saudita, com 21 e 19 citações, respectivamente, aponta para a relevância crescente em regiões com menos tradição em pesquisa científica sobre o tema, indicando expansão do interesse global e diversificação quanto às contribuições para o avanço desse campo.

Em relação às instituições de ensino e pesquisa que mais contribuíram para os estudos sobre tungstato de prata, pode-se observar, pelo **Gráfico 14**, as mais citadas nos documentos analisados.

Gráfico 14 - Produção científica por instituição

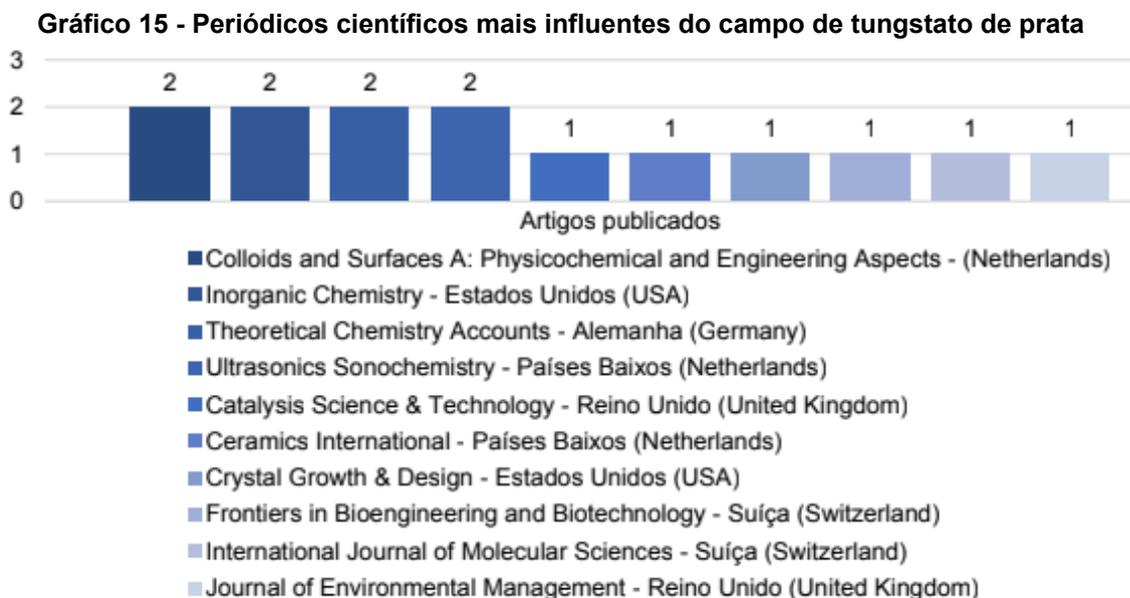
Fonte: Dados extraídos de Biblioshiny (2024).

Entre as instituições de ensino e pesquisa que mais contribuíram para esta pesquisa, destacam-se, em primeiro lugar, a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) e a Universidade Estadual Paulista (UNESP), ambas com oito produções; em seguida, a University of Madras (Índia) ocupa a segunda posição, com sete publicações; em terceiro lugar está a Universitat Jaume I (Espanha), com seis trabalhos publicados. O Brasil, em particular, tem desempenhado um papel importante nas pesquisas referentes ao assunto, sendo que várias de suas instituições organizam-se em grupos de trabalho para fomentar a produção científica nessa área, consolidando sua relevância no cenário internacional.

As 20 publicações analisadas foram divulgadas em 16 periódicos científicos, refletindo a diversidade e o alcance das pesquisas sobre tungstato de prata em diferentes áreas do conhecimento. Esses periódicos atuam como plataformas essenciais para a comunicação de descobertas que combinem aspectos teóricos e práticos, evidenciando a interdisciplinaridade e a importância crescente deste campo de pesquisa. Os principais periódicos científicos que publicam pesquisas na área de estudo estão representados no **Gráfico 15**, demonstrando-se a diversidade de revistas com altos níveis de impacto e especialização.

Têm destaque: 'Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects' (Países Baixos); 'Inorganic Chemistry' (Estados Unidos) e 'Theoretical Chemistry Accounts' (Alemanha). Cada um desses periódicos apresenta dois

artigos, apontando a relevância dessas publicações no campo de estudos de colóides, química inorgânica e química teórica.



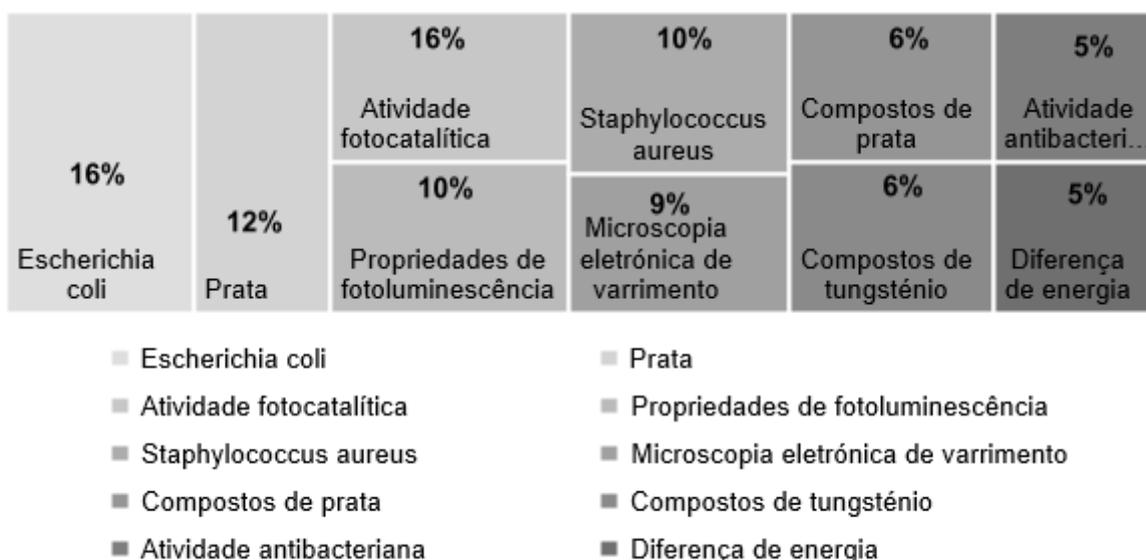
Fonte: Dados extraídos de Biblioshiny (2024).

Além disso, revistas como 'Ultrasonics Sonochemistry' e 'Ceramics International', ambas dos Países Baixos, também se destacam com dois artigos cada, indicando o papel relevante dessas publicações na disseminação de pesquisas avançadas em sonoquímica e cerâmica. Outras revistas, como 'Catalysis Science & Technology' (Reino Unido) e 'Crystal Growth & Design' (Estados Unidos), publicaram um artigo cada, mostrando a diversidade em abrangência de áreas, indo desde o crescimento de cristais até tecnologias de catálise. Essas revistas representam fontes essenciais para a difusão de novos conhecimentos e inovações tecnológicas em suas respectivas áreas de especialização. A árvore de palavras apresentada no **Quadro 20** oferece uma visão clara dos principais temas abordados nas pesquisas analisadas. Os termos mais dominantes são '*Escherichia coli*' e 'atividade fotocatalítica', ambos com 16% de relevância, destacando sua importância no campo de estudos sobre compostos antimicrobianos e aplicações fotocatalíticas.

Seguindo, o termo 'prata' aparece com 12%, reforçando o papel central desse elemento em processos relacionados à fotocatalise e suas propriedades antimicrobianas. Outros tópicos significativos incluem 'propriedades de

fotoluminescência' e '*Staphylococcus aureus*', ambos com 10%, sugerindo um foco nas características ópticas dos materiais e no combate a patógenos.

Quadro 20 - Árvore de palavras

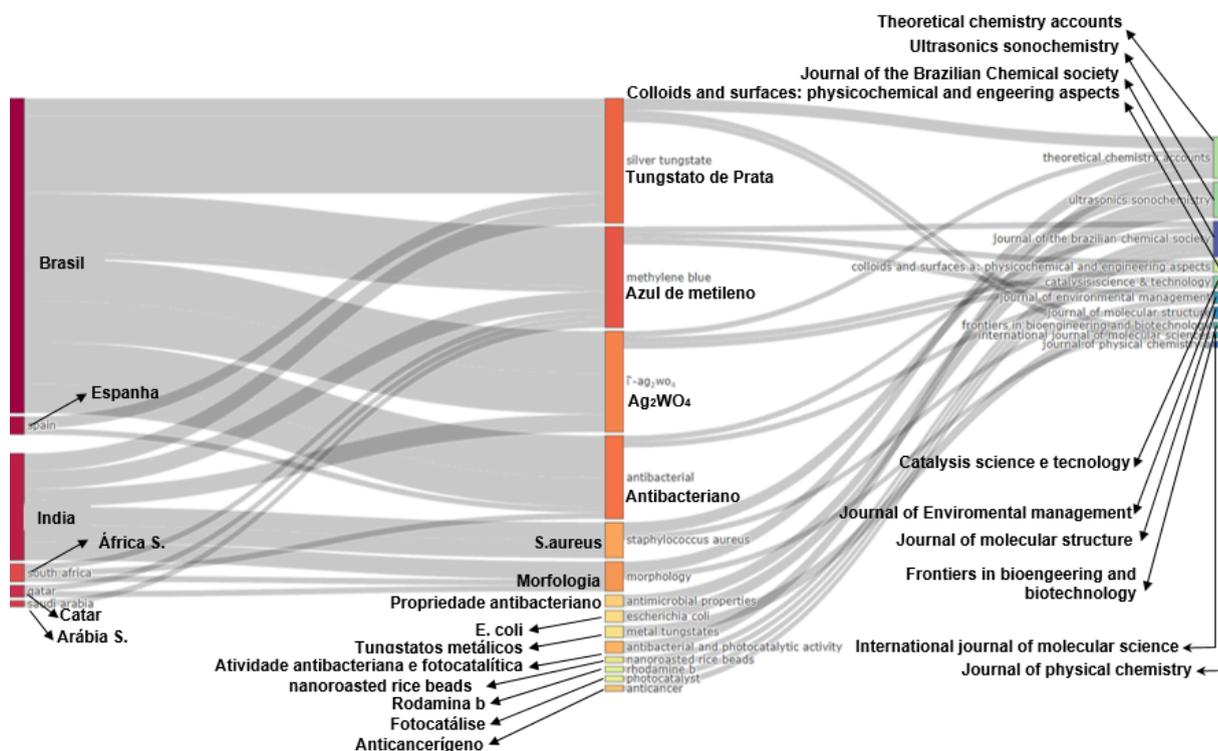


Fonte: Dados extraídos de Biblioshiny (2024).

Termos como 'microscopia eletrônica de varredura' (9%) e 'compostos de prata' (6%) indicam o uso de técnicas avançadas de caracterização e a exploração de materiais baseados em prata, enquanto tópicos como 'compostos de tungstênio', 'diferença de energia' e 'atividade antibacteriana' apresentam menor, mas ainda relevante, representação no mapa de pesquisa. Essa análise revela uma forte ênfase em aplicações antimicrobianas e fotocatalíticas, com foco em materiais como prata e suas interações com microrganismos patogênicos.

Intitulado "Três Campos" na plataforma Biblioshiny, o Diagrama de Sankey, oferece múltiplas possibilidades de interpretação e pode ser configurado conforme necessário para destacar diferentes tipos de informações: autor, instituição, país, palavras-chave, revista, título, referências, resumos e citações de revistas, oferecendo uma análise visual detalhada das conexões. Para esta leitura, foram arbitrados 'países', 'termos' e 'revistas' mais relevantes na pesquisa sobre tungstato de prata. No **Quadro 21**, optou-se por destacar três campos específicos: os cinco principais países de origem das pesquisas, as 15 palavras mais frequentes nos artigos da base de dados e as dez revistas mais influentes.

Quadro 21 - Diagrama de Sankey



Fonte: Dados extraídos de Biblioshiny (2024).

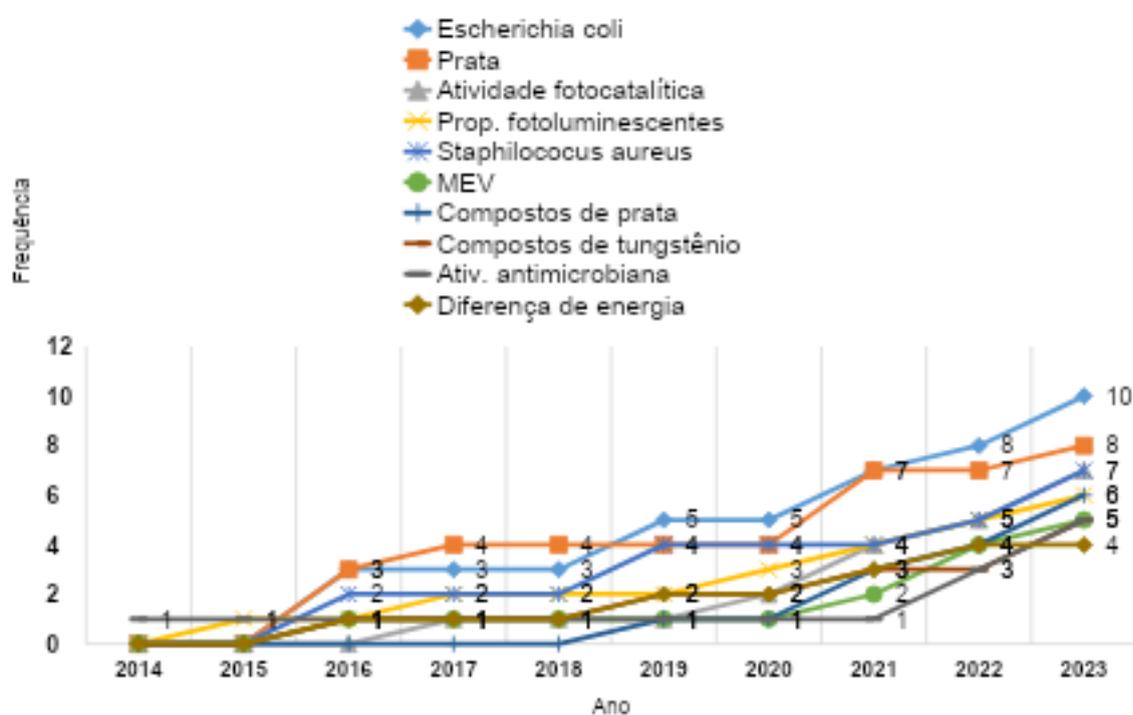
A análise do quadro revela um foco claro na pesquisa sobre tungstato de prata, evidenciado pela conexão, em torno desse tema, entre diversos países, como Brasil, Espanha, Índia, África do Sul, Catar, e Arábia Saudita. As pesquisas sobre Ag_2WO_4 abordam tópicos como *E. coli*, *S. aureus*, atividade antibacteriana e microscopia eletrônica de varredura, e são publicadas em revistas científicas renomadas, como 'Catalysis Science & Technology', 'Journal of Environmental Management' e 'Journal of Molecular Structure', entre outras.

Além disso, a imagem destaca que os principais tópicos investigados incluem atividade fotocatalítica, propriedade antibacteriana, e morfologia, com publicações em periódicos de alta relevância como 'International Journal of Molecular Science' e 'Journal of Physical Chemistry'. Esse mapeamento evidencia a interconexão entre os diferentes países, temas de pesquisa, bem como os periódicos onde os resultados são publicados, demonstrando a relevância global e interdisciplinar das pesquisas envolvendo tungstato de prata.

O gráfico apresentado no **Gráfico 16** oferece uma visão clara do uso de palavras-chave ao longo dos anos, destacando a frequência com que termos

específicos foram abordados em pesquisas de 2014 a 2023 (2023, último ano onde houve ocorrências). Entre os termos analisados, observa-se um crescimento acentuado na frequência de uso de '*Escherichia coli*' e 'prata', que atingem os maiores valores em 2023, com dez e oito menções, respectivamente. Outros termos, como 'atividade fotocatalítica' e '*Staphylococcus aureus*', também apresentam aumento gradual na frequência ao longo do período, refletindo a crescente relevância desses tópicos nas investigações científicas.

Gráfico 16 - Frequência de uso das palavras ao longo dos anos

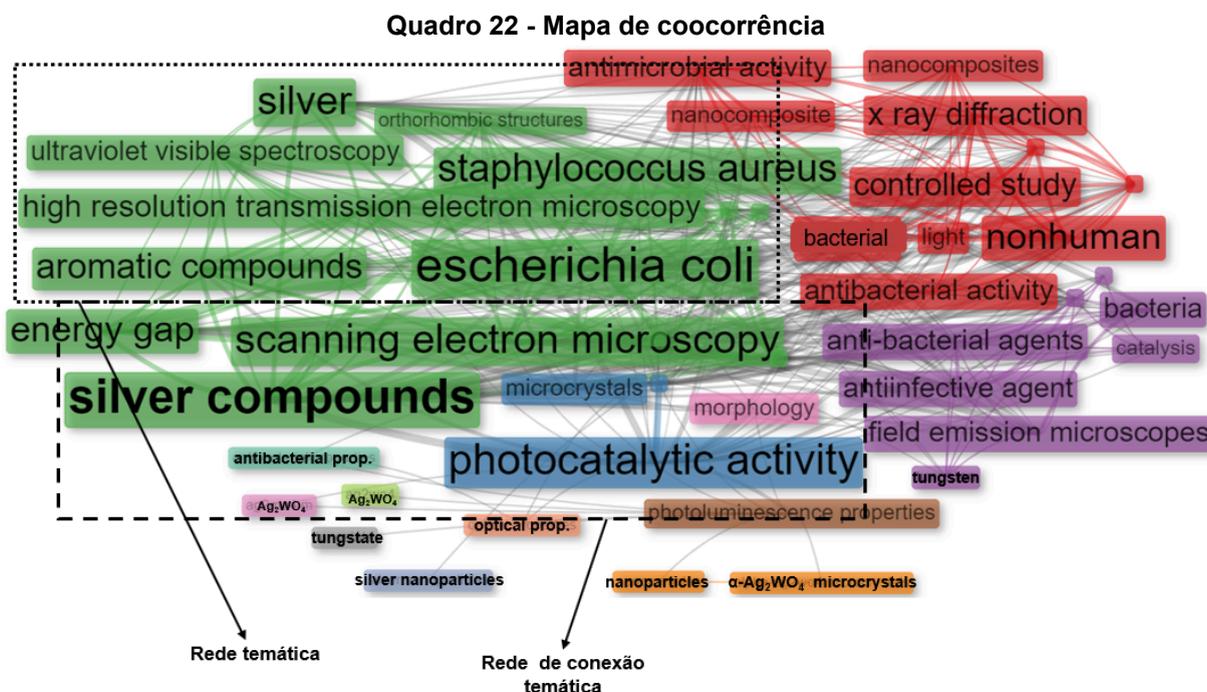


Fonte: Dados extraídos de Biblioshiny (2024).

Além disso, termos como 'compostos de tungstênio' e 'propriedades fotoluminescentes' mostram uma tendência de crescimento mais estável, indicando um foco contínuo em materiais avançados e suas propriedades. A análise sugere que o interesse por temas antimicrobianos e fotocatalíticos, especialmente envolvendo prata e patógenos como '*E. coli*' e '*S. aureus*', tem aumentado significativamente, o que denota tendências emergentes na pesquisa científica.

O **Quadro 22** apresenta um mapa de co-ocorrência de palavras-chave, que destaca as interações entre termos frequentemente citados em conjunto pelos autores. Essa análise visual permite identificar a formação de grupos temáticos com

base na quantidade de citações conjuntas e na intensidade das interações entre os termos. Conforme Cobo *et al.* (2011), as palavras-chave e suas conexões em um tema formam uma rede temática, onde cada rede é identificada pela palavra-chave mais significativa e central.



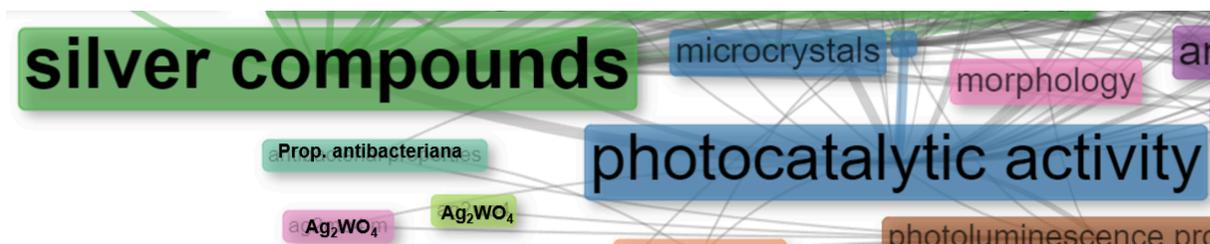
Fonte: Dados extraídos de Biblioshiny (2024).

O gráfico revela que as palavras estão interligadas por links cuja espessura reflete a intensidade do vínculo, ou seja, o número de vezes que essas palavras aparecem juntas em documentos. Os termos mais frequentes e interconectados, como 'silver compounds', 'photocatalytic activity' e 'Ag₂WO₄', indicam o foco em temas relacionados a compostos de prata e suas aplicações fotocatalíticas, particularmente em pesquisas sobre tungstato de prata.

Além da rede temática, uma segunda rede, chamada rede de conexão temática, como mostrado no **Quadro 23**, vincula os documentos relacionados a cada grupo de palavras-chave, categorizando-os em documentos principais (aqueles que contêm todas as palavras-chave do grupo) e documentos secundários (que compreendem apenas algumas palavras do grupo). O exemplo de 'Silver compounds – Photocatalytic activity – Ag₂WO₄' demonstra um conjunto de termos frequentemente associados em estudos de relevância no campo da fotocatalise, ressaltando sua importância para pesquisas emergentes e consolidadas nessa área.

Tal análise ajuda a definir conceitos, orientar novas pesquisas e compreender as conexões entre temas relevantes no contexto científico, além de oferecer diversas possibilidades de composição de palavras dentro dos grupos temáticos.

Quadro 23 - Detalhes de link temático

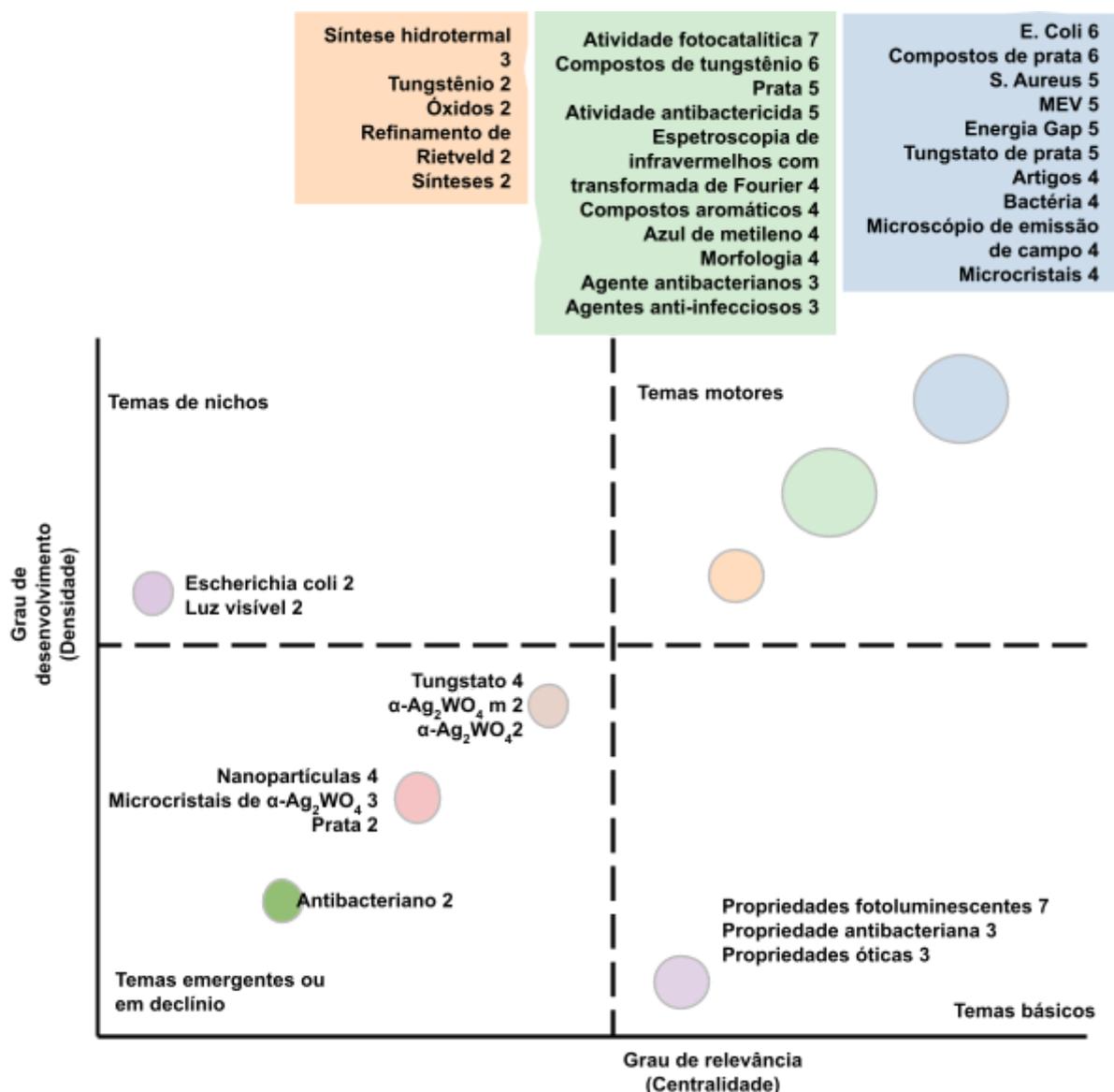


Fonte: Dados extraídos de Biblioshiny (2024).

O mapa temático apresentado fornece uma visão abrangente dos principais interesses de pesquisa que envolvem tungstato de prata e agentes biocidas, conforme ilustrado no **Quadro 24**. Os clusters, que representam temas de pesquisa, são organizados e classificados com base em duas dimensões: centralidade, que indica a relevância de um tema no desenvolvimento do campo teórico; e densidade, que reflete a coesão interna das palavras-chave que compõem um tema (Cobo *et al.*, 2011). Essa estrutura oferece uma análise visual clara, facilitando a identificação dos principais focos de pesquisa e a interconexão entre temas, permitindo uma compreensão mais profunda dos tópicos de interesse e seus níveis de desenvolvimento dentro do campo.

A centralidade reflete a importância de um tema no avanço do campo teórico, enquanto a densidade indica a coesão interna das palavras que compõem cada tema. O quadrante superior esquerdo abrange temas especializados e periféricos que, embora relevantes em nichos específicos, têm uma influência menor no desenvolvimento global do campo. ‘*Escherichia coli*’ e ‘luz visível’ são exemplos de tópicos que possuem baixa centralidade e densidade, o que sugere que eles são de importância secundária, possivelmente áreas de estudo menos amplas ou aplicadas em contextos específicos.

Quadro 24 - Mapa temático formado pelas palavras-chave dos autores



Fonte: Dados extraídos de Biblioshiny (2024).

No quadrante inferior esquerdo, encontram-se temas desenvolvidos, mas marginais, como 'tungstato de prata', 'nanopartículas' e 'agentes antibacterianos'. Esses temas representam áreas que podem estar em emergência ou declínio, ou seja, tópicos que, apesar de desenvolvidos, têm relevância moderada e podem estar perdendo ou ganhando espaço no cenário científico.

Já o quadrante superior direito contém os temas motores, que são altamente explorados e centrais ao desenvolvimento da pesquisa. 'Atividade fotocatalítica', 'compostos de tungstênio', 'prata' e 'compostos aromáticos' estão neste quadrante, refletindo um alto grau de interesse e relevância no campo. Esses temas

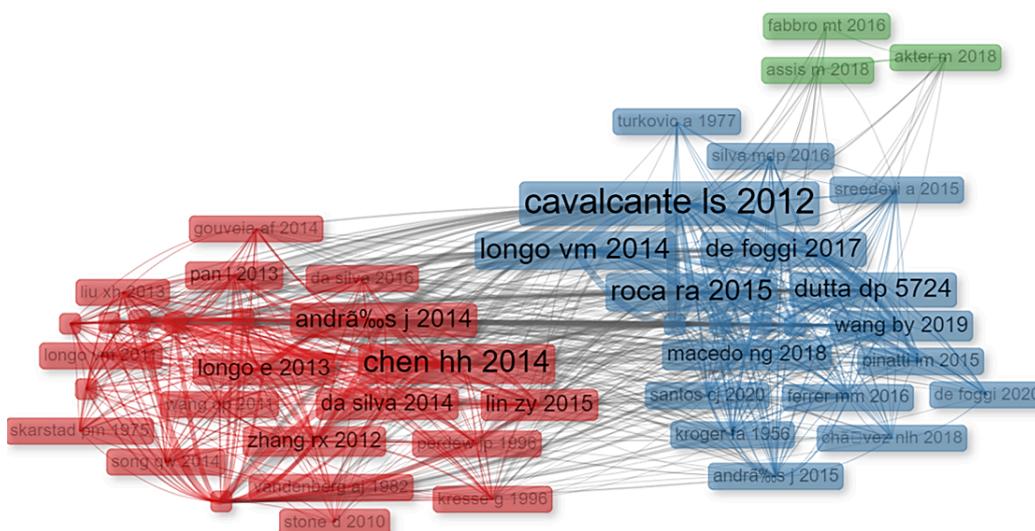
demonstram forte coesão interna e impacto significativo nas investigações científicas atuais.

Por fim, o quadrante inferior direito abriga temas básicos, que são fundamentais para o desenvolvimento do campo, mas que ainda precisam de maior exploração. Exemplos incluem: ‘propriedades fotoluminescentes’ e ‘propriedades antibacterianas’, que são essenciais para o avanço tecnológico e científico, mas cuja exploração ainda pode ser ampliada.

A análise do mapa temático destaca o aumento do interesse por tópicos como ‘atividade fotocatalítica’ e ‘atividade antibacteriana’, que são críticos para enfrentar desafios como infecções resistentes a medicamentos e contaminantes no meio ambiente construído. A presença de compostos de prata e compostos de tungstênio no quadrante motor reforça o contínuo interesse por materiais avançados, com propriedades inovadoras e aplicações em diferentes áreas científicas e tecnológicas.

No **Quadro 25**, apresenta-se uma rede de co-citações onde artigos referenciam-se mutuamente. Os trabalhos foram distribuídos em três clusters. Alguns desses clusters têm destaque pela presença de artigos principais, representados com fonte maior, refletindo o número superior de citações recebidas quanto aos demais artigos dentro do cluster.

Quadro 25 - Rede de cocitações sobre produções relacionados ao tungstato de prata



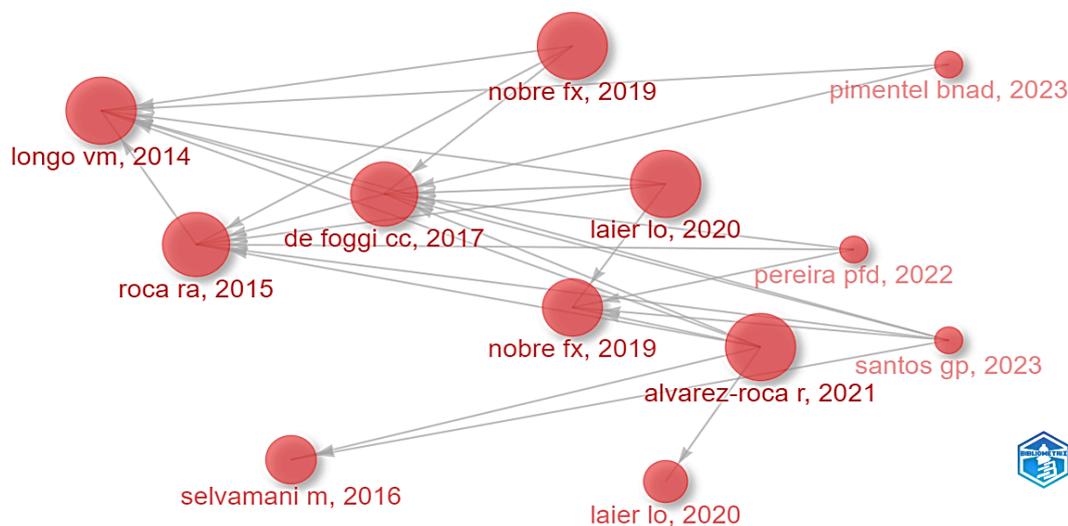
Fonte: Dados extraídos de Biblioshiny (2024).

O grupo vermelho, representado por Chen e Xu (2014) é o maior cluster, com 25 trabalhos alinhados aos deste autor, intitulado 'Photoactivity and stability of Ag₂WO₄ for organic degradation in aqueous suspensions'.; o cluster representado por Cavalcante *et al.* (2012) traz 21 trabalhos relacionados à publicação 'Cluster coordination and photoluminescence properties of α -Ag₂WO₄ microcrystals'; e, o menor grupo, representado por Assis *et al.* (2018), apresenta três pesquisas convergentes com o pensamento do cluster.

Com essa observação, pode-se concluir que alguns artigos seguem a mesma linha de pesquisa de outros, pois suas citações estão alinhadas com os temas centrais de cada um. Isso permite identificar interconexões entre aqueles que explorem a mesma temática de pesquisa. Ademais, o **Quadro 25**, complementando o **Quadro 24**, mostra a rede histórica de citações, destacando as relações temporais e temáticas entre os estudos. Essa análise facilita a visualização das tendências de pesquisa e das influências mútuas entre os trabalhos ao longo do tempo, proporcionando uma compreensão mais profunda do desenvolvimento acadêmico na área.

O **Quadro 26** ilustra um histórico de citações, onde o tamanho das esferas indica o número de vezes que cada artigo foi citado. O quadro também mapeia temporalmente a origem de alguns artigos recentes, destacando suas inter-relações, e apresenta uma rede de cocitações, ilustrando as interações entre diferentes autores e suas respectivas publicações. Cada nó (círculo) no quadro corresponde a um artigo, e as arestas (linhas) entre os nós indicam que esses artigos foram citados conjuntamente a outros trabalhos. A espessura das linhas reflete a intensidade das cocitações, ou seja, quanto mais grossa a linha, mais frequentemente os artigos foram citados em conjunto, sugerindo uma forte correlação entre eles.

O estudo de Longo (2014) aparece como central na rede, sendo amplamente cocitado com outras publicações, o que sugere sua relevância no conjunto de pesquisa analisado. Há uma relação expressiva entre os artigos de Foggi (2017) e Laier (2020), demonstrando uma interdependência temática no campo de estudo. Da mesma forma, outros trabalhos, como os de Nobre (2019) e Alvarez-Roca (2021) também apresentam uma alta frequência de cocitações, refletindo um alinhamento em suas abordagens ou áreas de interesse.

Quadro 26 - Histograma de histórico de citações

Autores	Citação
LONGO VM, 2014, J PHYS CHEM A	(Longo <i>et al.</i> , 2014)
ROCA RA, 2015, CATAL SCI TECHNOL	(Andrés <i>et al.</i> , 2014a)
SELVAMANI M, 2016, MAT SCI ENG C-MATER	(Selvamani <i>et al.</i> , 2016)
DE FOGGI CC, 2017, CRYST GROWTH DES	(Foggi <i>et al.</i> , 2017)
NOBRE FX, 2019, ULTRASON SONOCHEM	(Nobre <i>et al.</i> , 2019)
LAIER LO, 2020, THEOR CHEM ACC	(Longo <i>et al.</i> , 2020)
PEREIRA PFD, 2022, INT J MOL SCI	(Bastos <i>et al.</i> , 2022)
PIMENTEL BNAD, 2023, FRONT BIOENG BIOTECH	(Pimentel <i>et al.</i> , 2023)

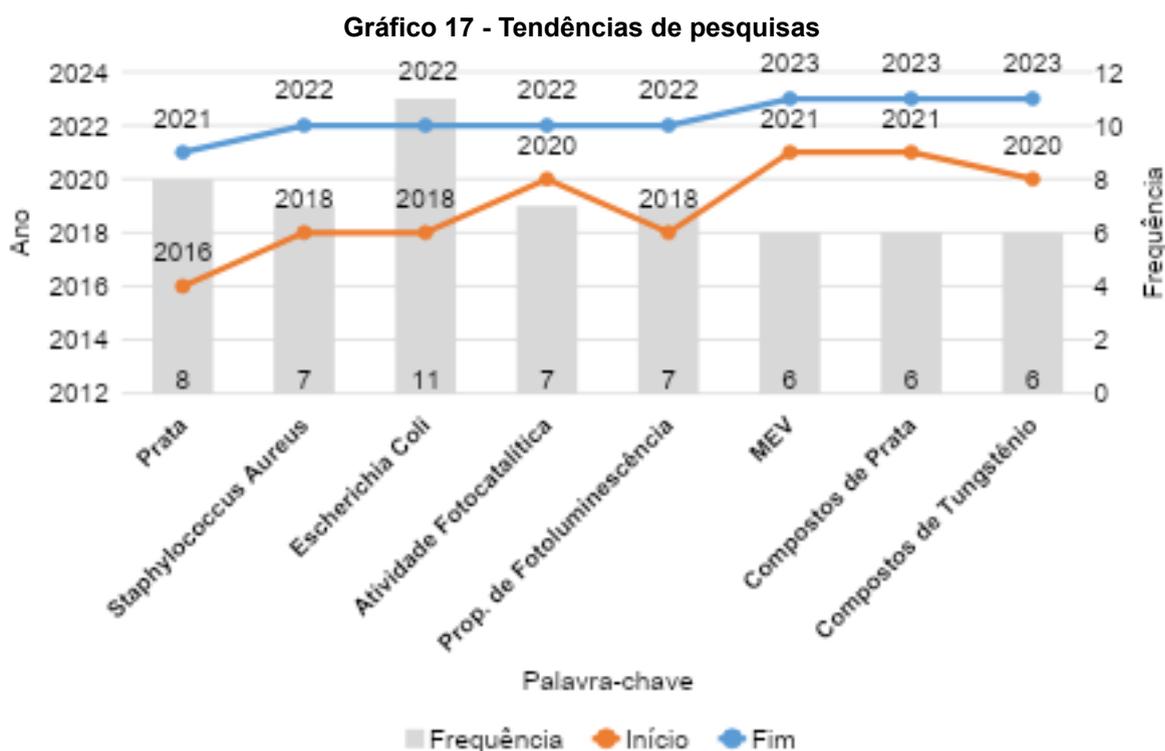
Fonte: Dados extraídos de Biblioshiny (2024).

Artigos mais recentes, como os de Pimentel (2023) e Santos (2023), apresentam um menor número de co-citações, o que é natural, considerando que estão em fase inicial de acumulação de referências. À medida que mais estudos forem citando esses trabalhos, espera-se que a interconectividade com outras publicações cresça.

A análise da rede de histórico de co-citações revela que determinados artigos desempenham um papel central na formação da base teórica e metodológica do campo de estudo, estabelecendo uma rede de influências acadêmicas. As interconexões entre esses estudos indicam o desenvolvimento de linhas de pesquisa bem consolidadas e influentes, que moldam a direção atual das pesquisas. O mapeamento temporal e temático, representado pelo **Quadro 26**, também destaca a evolução do campo, desde os artigos clássicos, que continuam sendo referências, até os artigos recentes, que começam a se estabelecer. Esse tipo de mapeamento é

essencial para compreender o progresso científico e as inter-relações que sustentam o desenvolvimento do conhecimento ao longo do tempo.

O gráfico de tendências de pesquisa apresenta a evolução temporal de palavras-chave relevantes, indicando a frequência com que esses termos apareceram em publicações ao longo dos anos, como mostrado no **Gráfico 17**. As curvas de início e fim destacam os anos em que as palavras começaram a ganhar mais atenção nas pesquisas e quando elas alcançaram um pico de relevância. Termos como ‘prata’ e ‘atividade fotocatalítica’ têm uma frequência alta (oito e 11 ocorrências, respectivamente), mostrando que esses tópicos vêm sendo amplamente pesquisados, com o interesse aumentando consistentemente até 2023. ‘*Escherichia coli*’ e ‘propriedades de fotoluminescência’ também demonstram relevância contínua, atingindo picos em 2018 e 2022.



Fonte: Dados extraídos de Biblioshiny (2024).

Alguns temas, como ‘compostos de prata’, ‘MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura)’ e ‘compostos de tungstênio’, apresentam uma frequência estável (seis ocorrências cada), sugerindo um interesse sólido, mas sem grandes variações nos últimos anos. O gráfico indica que certos termos, como ‘*Staphylococcus aureus*’, estão apresentando uma leve queda no número de menções, com um pico inicial em

2016 e menor atenção a partir de 2021. A curva de fim de pesquisa para '*Escherichia coli*' também aponta um ligeiro declínio no interesse após 2022.

Esse gráfico permite identificar temas que estão em ascensão, como 'atividade fotocatalítica' e 'propriedades de fotoluminescência', sugerindo o foco crescente em áreas de pesquisa relacionadas a materiais e aplicações antimicrobianas. Por outro lado, temas como '*Staphylococcus aureus*' e 'compostos de tungstênio', mantêm uma relevância estável, mas sem grande crescimento recente, indicando que essas áreas estão bem estabelecidas, mas podem não ser o foco principal das pesquisas emergentes.

4.2 Prospecção tecnológica de patentes

Para a prospecção de patentes, foram realizados testes preliminares com o objetivo de entender as bases de dados e identificar as estratégias mais eficazes para localizar os trabalhos relevantes. Esses experimentos foram conduzidos na base de patentes do Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), que está sob a jurisdição do Ministério da Economia do Brasil, e na base WIPO-PATENTSCOPE, administrada pela Organização Mundial da Propriedade Intelectual. O objetivo principal dessa investida foi adquirir conhecimento e familiaridade com as bases mencionadas.

4.2.1 Definições

Após a prospecção tecnológica, concluiu-se que a estratégia mais eficiente para a pesquisa é utilizando as classificações IPC (International Patent Classification) ou CPC (Cooperative Patent Classification), que são sistemas de Classificação Internacional de Patentes (CIP). O primeiro procedimento, na base WIPO-PATENTSCOPE, foi pesquisar a melhor definição dos termos de busca principais para, em seguida, identificar os IPCs relevantes ao objeto de estudo, considerando a versão [2024.01]. O termo inicialmente definido foi '*Biocide Paint*'. O resultado da busca, trouxe os códigos IPC mostrados no **Quadro 27**.

A CIP utiliza um sistema de códigos alfabéticos para categorizar as invenções de acordo com suas áreas de aplicação. Cada letra corresponde a um setor específico: A refere-se a necessidades humanas; B a operações de processamento

e transporte; C à química e metalurgia; D a têxteis e papel; E a construções fixas; F a engenharia mecânica, iluminação, aquecimento, armas e explosivos; G à física; e H à eletricidade.

Quadro 27 - Códigos IPC - International Patent Classification

IPC	DESCRIÇÃO
B44D 2/00	Técnicas especiais em pinturas artísticas ou desenho, por exemplo, pintura a óleos, pintura a água, pintura pastel, pintura relevo [2006.01]
B44D 3/04	Caixas de pintura [2006.01]
B44D 7/00	Preservação de pintura, por exemplo, por envernizamento [2006.01]
C09D 5/02	Tintas de emulsão [2006.01]
C09D 5/03	Tintas em pó (C09D 5/46 tem precedência) [2006.01]
C09D 5/04	Tintas de tixotrópicas [2006.01]
C09D 5/06	Tintas de artistas [2006.01]
C09D 5/14	Tintas que contenham biocidas, por exemplo, fungicidas, inseticidas ou pesticidas (C09D 5/16 tem precedência) [2006.01]
C09D 5/16	Tintas anti-incrustantes; tintas subaquáticas [2006.01]
C09D 5/18	Tintas a prova de fogo [2006.01]
C09D 11/00	Tintas [2014.01]
G01N 33/32	Tintas; tintas [2014.01]

Fonte: Dados extraídos de INPI/IPC Publication (2024).

Esses códigos ajudam a identificar rapidamente o campo técnico ao qual cada invenção pertence, facilitando a organização e a busca por patentes relacionadas em diferentes áreas da ciência e tecnologia. Entre os códigos de mais aderência com a pesquisa, o C09D 5/14 está diretamente relacionado: ‘Tintas que contenham biocidas, por exemplo, fungicidas, inseticidas ou pesticidas (C09D 5/16 tem precedência) [2006.01]’ (IPC, 2024). O número entre colchetes, ‘[2006.01]’, é o ano de inserção do código no sistema internacional de busca.

4.2.2 Patentometria

Para a análise tecnométrica da prospecção tecnológica, foram considerados diversos dados, incluindo a tendência de evolução temporal, os países de origem, os tipos de patentes, os inventores, keywords e IPC. Os dados utilizados nesta análise compõem o portfólio tecnológico.

Nesta seção, são apresentados os resultados das prospecções patentárias realizadas no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI). Inicialmente, foram identificadas 5.642 patentes. Após uma análise detalhada dos títulos e dos textos

completos, foram selecionadas 29 patentes, que demonstram uma forte relação com o tema pesquisado, 'tintas biocidas'. A **Tabela 10** resume os Códigos Internacionais de Patentes (IPCs) encontrados nos documentos das patentes que compõem o portfólio final. Essa análise detalhada proporciona uma visão abrangente das inovações tecnológicas e das tendências atuais no desenvolvimento de tintas com propriedades biocidas, evidenciando as principais áreas de pesquisa e aplicação.

Tabela 10 - Códigos IPC citados

C09D 5/14 12	A01N 59/16 3	A01N 59/20 2	A01N 25/34 ; 1	A01N 59/00 ; 1	A01N 59/12 1	A01P 1/00 ; 1	A01P 7/04 1	
			A01N 37/20 1	A61L 31/02 1	C08K 3/10 1	C08K 5/098 1	C09D 11/00 1	
		A01N 25/08 ; 2	A01N 65/00 2	A01N 43/40 1	C04B 40/00 ; 1	C09D 11/102 1	C09D 201/00 1	C09D 5/02 1
	A01N 43/80 1			C04B 41/50 ; 1	C09D 133/18 1	C09D 5/33 1	D01F 1/10 ; 1	D06M 11/... 1
	A01N 25/10 ; 2	A01N 25/28 1	A01N 53/00 1	C08K 3/08 ; 1	C09D 163/00 1	C11D 3/48 ; 1	D21H 21/36 1	

Fonte: Dados extraídos de INPI/IPC Publication (2024).

O código C09D 5/14 teve 12 citações nos documentos analisados, concentrando o maior percentual de indicação, seguido do código A01N 59/16 (metais pesados; compostos dos mesmos), pertencente ao grupo A01N 59/00 (biocidas, repelentes ou atrativos de pestes ou reguladores do crescimento de plantas contendo elementos ou compostos inorgânicos), com três citações de classificação, e os códigos A01N 25/08 (contendo sólidos como carreadores ou diluentes) e A01N 25/10 (compostos macromoleculares), pertencentes ao grupo principal A01N 25/00 biocidas, repelentes ou atrativos de pestes ou reguladores do crescimento de plantas, caracterizados por suas formas ou por seus ingredientes inativos ou por seus métodos de aplicação; substâncias para reduzir o efeito nocivo dos ingredientes ativos para outros organismos que não sejam pestes).

Ao observar a tabela da IPC, podemos fazer uma análise destacando os principais grupos de classificação de patentes. No Grupo C – Química e Metalurgia,

encontramos subclasses que tratam de compósitos metálicos (C08K 3/10), sais metálicos de ácidos carboxílicos (C08K 5/098), tintas de emulsão (C09D 5/02), tintas que contenham biocidas como fungicidas, inseticidas ou pesticidas (C09D 5/14), homopolímeros ou copolímeros de nitrilas (C09D 133/18) e composições de revestimento à base de resinas epóxi (C09D 201/00). Esses exemplos mostram uma diversidade de patentes relacionadas a materiais avançados e suas aplicações químicas e industriais.

No Grupo A01 – Agricultura; Silvicultura; Pecuária; Caça; Captura; Pesca, vemos subclasses que envolvem metais pesados e seus compostos (A01N 59/16), sólidos como suportes ou diluentes (A01N 59/02), cobre (A01N 59/20), microcápsulas (A01N 25/28) e formas moldadas (A01N 25/34). Além disso, as subclasses relacionadas a pesticidas ou desinfetantes, atraentes ou repelentes de animais, e reguladores de crescimento de plantas (A01P 1/00 e A01P 7/04), refletem o interesse em proteger e melhorar a saúde humana.

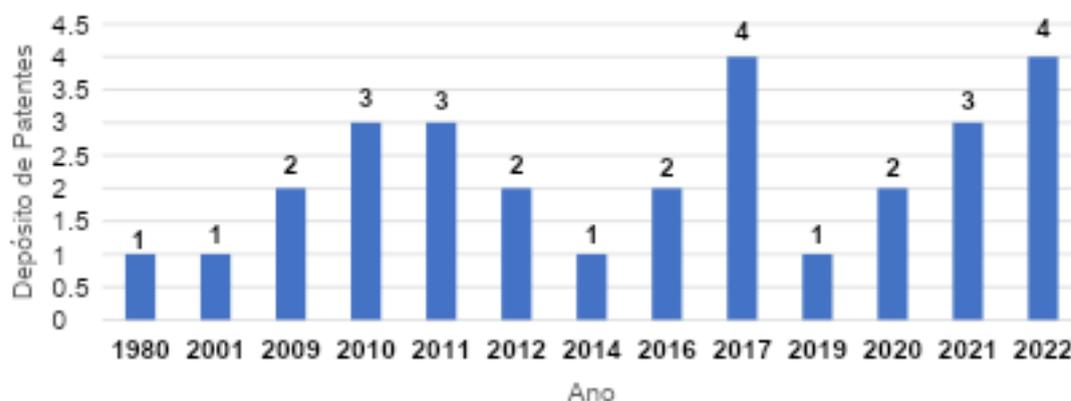
A **Tabela 10** também mostra patentes no Grupo C04 – Cimentos; Concreto; Argamassa; Cerâmica; Refratários; Tratamento de Superfícies, com subclasses que abordam processos para influenciar propriedades de argamassas (C04B 40/00), uso de materiais inorgânicos (C04B 41/50) e metais (C04B 47/06). A análise da tabela IPC revela um foco considerável em patentes que envolvem o uso de materiais químicos e compostos, refletindo uma diversidade de aplicações em tratamento de superfícies, biocidas e melhoramento de propriedades de materiais. Essa diversidade é indicativa do potencial amplo de aplicações tecnológicas e industriais.

Ao analisar a produção de documentos patenteados ao longo do tempo, observamos que os anos de 2010 e 2022 tiveram os maiores registros, com três documentos patenteados em cada ano. Os anos de 2009, 2016, 2017 e 2021 acumularam dois documentos patenteados cada. Nos demais anos, foi registrado um documento patenteadado por ano. Essa evolução é ilustrada pelo **Gráfico 18**, permitindo uma visão clara da tendência temporal na produção de patentes.

A evolução temporal das patentes revela que a preocupação com o uso de biocidas em materiais de revestimento começou a emergir na década de 1980, ano em que foi realizado o depósito da patente, sob o registro com número PI 8006087-0, denominada ‘Soluções aquosas de silicato de amina de metal, composições, veículos de tinta de látex, materiais amorfos, unguentos, graxas,

elastômeros, processo para modificar um substrato, e processo para realizar tratamentos antimicrobianos', com o IPC D21H 21/36, pela Dow Corning Corporation (1980).

Gráfico 18 - Série temporal dos depósitos de patentes sobre tintas biocidas no Brasil

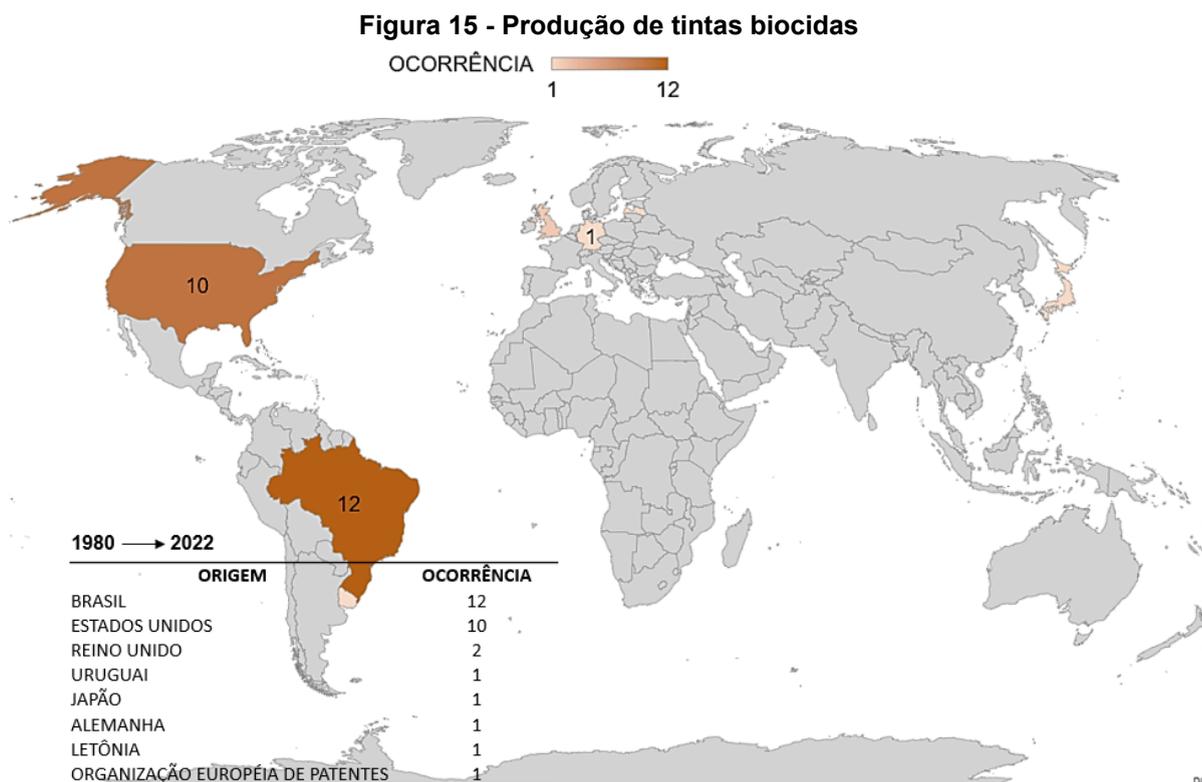


Fonte: Dados extraídos de INPI/IPC Publication (2024).

Naquele período, a primeira patente registrada (Prye; Daudt; Hyde, 1980) descrevia uma composição de tinta látex com aditivos de óxidos de prata, zinco, cádmio e mercúrio, resultando em uma tinta com propriedades antibacterianas. Até o início da década de 2010, foram patenteados sete produtos que incorporavam algum tipo de biocida ou que buscavam tornar a tinta funcional além de suas funções de revestimento e apelo estético. Entre 2011 e 2020, houve uma média de uma a duas patentes registradas anualmente nos países analisados. No entanto, entre 2022 e 2023, observou-se um aumento significativo no número de pedidos de patentes para esses produtos, muito provavelmente influenciado pela pandemia de covid-19.

A **Figura 15**, sobre a produção de tintas biocidas por países entre 1980 e 2022, revela um panorama significativo da atividade de pesquisa e desenvolvimento nessa área. Entre os países que mais solicitaram patentes, o Brasil tem destaque com 12 solicitações, seguido pelos Estados Unidos com 10. A liderança do Brasil, com 12 patentes, o que indica uma relevante atividade de pesquisa e desenvolvimento no campo das tintas biocidas, refletindo trabalhos voltados para a inovação tecnológica.

Os Estados Unidos, com dez patentes, também demonstram interesse contínuo e significativo nessa área. O Reino Unido, com duas solicitações, apresenta uma atividade menor, mas ainda relevante, em pesquisa e desenvolvimento de tintas biocidas. Outros países, como Uruguai, Japão, Alemanha, Letônia, e a Organização Europeia de Patentes, contribuíram com uma patente cada, evidenciando um interesse global diversificado, embora em menor escala.

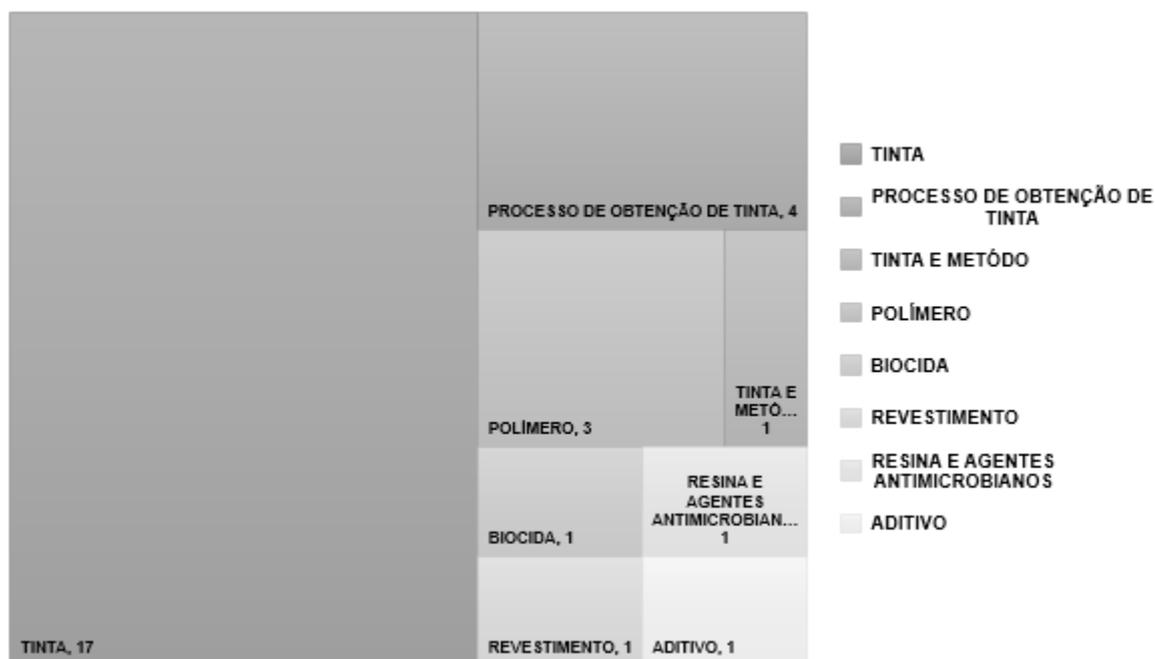


Fonte: Dados extraídos de INPI/IPC Publication (2024).

Em conclusão, confirma-se a liderança do Brasil no número de solicitações de patentes para tintas biocidas, seguido pelos Estados Unidos, demonstrando-se um investimento considerável em novas tecnologias. Outros países também apontam interesse, ainda que de forma menos intensa. Esse panorama sugere que o Brasil esteja na vanguarda do desenvolvimento de tecnologias de tintas biocidas, possivelmente impulsionado por políticas governamentais de incentivo à inovação, investimentos em pesquisa e desenvolvimento, e a necessidade de soluções eficazes para problemas locais.

O **Quadro 28** ilustra a distribuição de diferentes tipos de patentes relacionadas a revestimentos funcionais com biocidas, organizando as invenções por categorias temáticas.

Quadro 28 - Tipos de patentes e titularidade



TITULARIDADE	DEPOSITANTE
Alessandro Aparecido De Carvalho Lopes	Isolucks Do Brasil Ltda - Epp (Br/Sp)
Andrea Preuss, <i>et al.</i>	Basf Se (De)
Beat Heer, <i>et al.</i> -	Nutrition & Biosciences Usa 2, Llc
Cecil Leonard Prye, <i>et al.</i>	Weg Indústrias S/A - Química (Br/Sc)
Carlos Walter Libisch Vidal	Dow Coming Corporation. (Us)
Duque Da Silva	Cd-Max Industria E Comercio De Tintas Ltda
Edson Carlos Tognin Filho, <i>et al.</i>	Universidade Estadual Do Centro-Oeste (Br/Pr)
Fauze Jacó Anaissi, <i>et al.</i>	Rohm And Haas Company (Us)
Han Liu, <i>et al.</i>	Massachusetts Institute of Technology (Us)
Jayanta Haldar, <i>et al.</i>	Alina, Sia (Lv)
Juris Kostjukovs, <i>et al.</i>	The Sherwin-Williams Company
Kathleen R. Gisser, <i>et al.</i>	Rohm And Haas Company E Dow Global Technologies Llc (Us)
Kenneth M. Donnelly, <i>et al.</i>	Arch Chemicals Inc. (Us)
Malcolm Greenhalgh, Et Al.	María Pilar Mateo Herrero (Es)
María Pilar Mateo Herrero	Hermes Paulo De Amorim Filho
Mariana Cruz Amorin Bonilha.	Dainichiseika Color & Chemicals Mfg. Co., Ltd. (Jp)
Masayuki Sibata, <i>et al.</i>	Augusto Kunrath - Vapor Technologies, Inc..
Miguel Pisaturo	Miguel Pisaturo (Br/Sp)
Patrick Sullivan, <i>et al.</i>	Augusto Kunrath - Vapor Technologies, Inc..
Ralph Brückner	Hecosol Gmbh (De)
Robert Timothy Gros	Robert Timothy Gros
Roger Errol Smith	Troy Technology Corporation, Inc. (Us)

Sergio Giorgetti Filho
Susan Mary Horley, *et al.*
Taiane Martinelli Da Silva
Weg Indústrias S/A - Química

Sergio Giorgetti Filho (Br/Sp)
Imperial Chemical Industries Plc (Gb)
Massafix Indústria E Comércio Ltda (Br/Es)

Fonte: Dados extraídos de INPI/IPC Publication (2024).

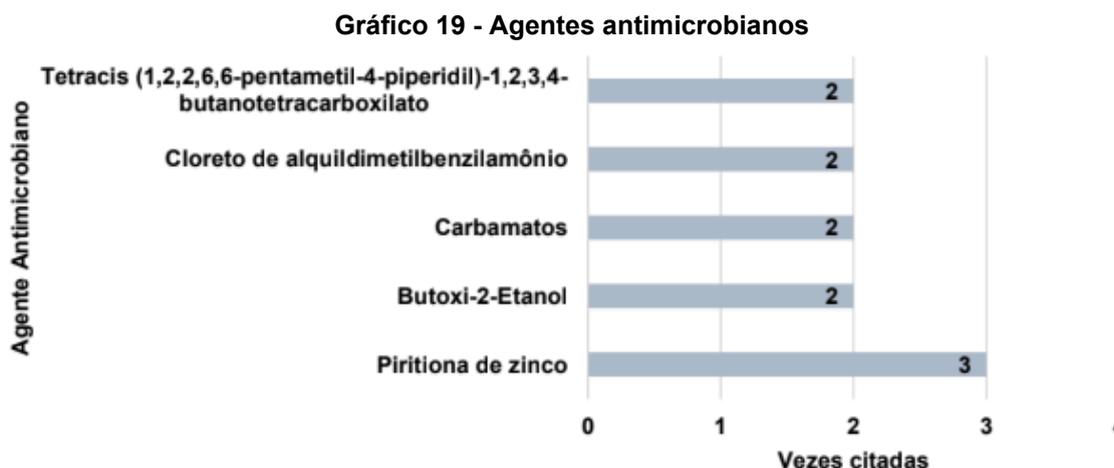
A análise demonstra que a categoria ‘tintas’ representa a maior proporção de patentes, com 17 invenções, o que reflete o alto nível de inovação relacionado ao desenvolvimento de tintas com propriedades funcionais. Em seguida, patentes que envolvem processos de obtenção de tintas aparecem em segundo lugar, com quatro invenções, destacando a importância da otimização e melhoria dos processos de fabricação para esse tipo de revestimento. Outras áreas de inovação incluem o uso de polímeros, com três invenções, o desenvolvimento de biocidas, e novos métodos para revestimentos, cada uma com uma única contribuição para o avanço de tecnologias aplicadas no controle de agentes microbianos.

As patentes em resinas e agentes antimicrobianos também têm destaque, refletindo o interesse em desenvolver revestimentos que possam proteger superfícies contra infecções e contaminações. Essa análise evidencia o foco das indústrias e inventores em melhorar as funcionalidades dos materiais de revestimento, com um grande número de propostas tecnológicas voltadas para o desenvolvimento de tintas e seus processos de fabricação.

Isso tudo se deve ao fato de ser um campo novo, onde a tecnologia existente permite, de forma eficiente, tratar as superfícies de modo geral e principalmente na arquitetura, combatendo agentes patógenos para saúde humana. A maioria das novas tecnologias tende a ser classificada como invenções. Quanto aos inventores, oriundos de vários países, como citado, todos contribuíram substancialmente para o desenvolvimento dessas tecnologias. A tabela de titularidade, complementar do **Quadro 28**, lista os principais depositantes e autores que solicitaram as patentes.

Na pesquisa realizada sobre depósito de patentes de tintas antimicrobianas, há uma média de 80 citações relacionadas ao uso de agentes antimicrobianos em tintas biocidas. O **Gráfico 19** apresenta a frequência de menção desses agentes, destacando aqueles mais utilizados na produção de tintas com propriedades biocidas. A análise dos dados revela que o Piritionato de Zinco é o agente antimicrobiano mais citado, com cerca de três menções.

Por conseguinte, esse composto é amplamente reconhecido por suas propriedades antibacterianas e antifúngicas, o que o torna um ingrediente chave em produtos que exigem ação biocida, como tintas e revestimentos. A eficácia no controle de microrganismos em superfícies é um dos principais motivos para sua frequente inclusão nas formulações de revestimentos funcionais. Para a análise, foram separados apenas os agentes que tiveram duas ou mais menções.



Fonte: Dados extraídos de INPI/IPC Publication (2024).

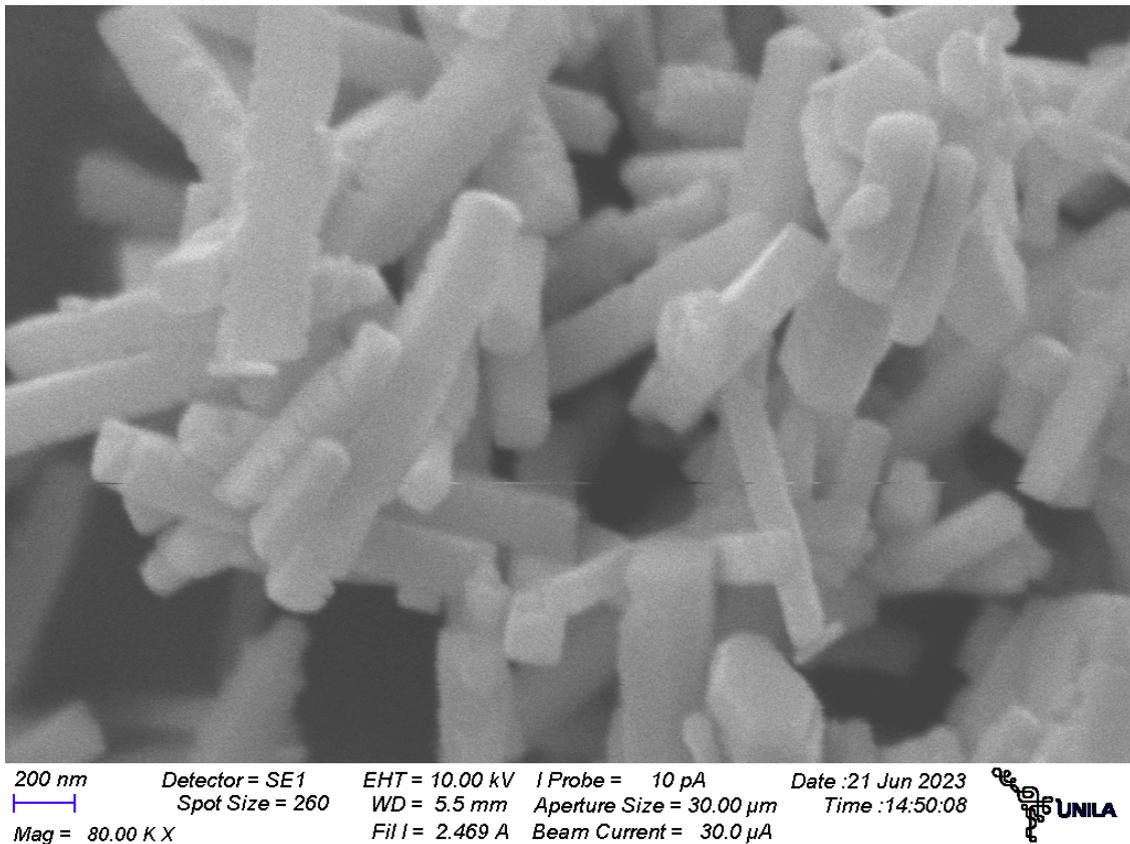
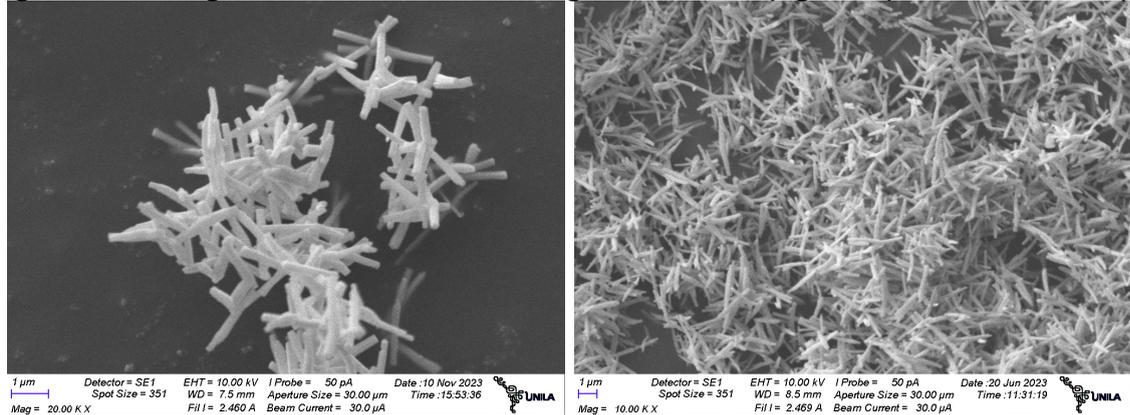
Seguindo a Piritiona de Zinco, o Tetracis (1,2,2,6,6-pentametil-4-piperidil)-1,2,3,4-butanotetracarboxilato é citado cerca de duas vezes. Esse composto é frequentemente usado como estabilizador de luz em plásticos e revestimentos, além de possuir propriedades antimicrobianas, justificando sua presença em formulações de tintas biocidas.

O Cloreto de Alquil Dimetil Benzil Amônio, igualmente citado cerca de duas vezes, é um quaternário de amônio comumente utilizado em desinfetantes e produtos de limpeza, devido às suas fortes propriedades antimicrobianas, conferindo durabilidade e eficácia antimicrobiana às tintas. Os carbamatos, com uma frequência de duas citações, são conhecidos por suas propriedades fungicidas e bactericidas, sendo utilizados em diversas aplicações, incluindo tintas, para prevenir o crescimento de microrganismos.

Por fim, o Butoxi-2-Etanol, também citado duas vezes, é utilizado como solvente, e possui propriedades antimicrobianas, melhorando a dispersão e a eficácia dos agentes biocidas nas tintas. Finalmente, destaca a Piritiona de Zinco como o agente antimicrobiano mais citado, sublinhando sua importância e eficácia

microscópicas em todas as amostras. O tungstato de prata (Ag_2WO_4), em suas diferentes fases cristalinas, alfa (α), beta (β) e gama (γ), exibe morfologias distintas, conforme as **Figuras 16, 17 e 18**. Uma distribuição abrangente de tamanhos de partículas é identificada, e as morfologias finais refletem os padrões distintos de crescimento inerentes aos três polimorfos.

Figura 16 - Micrografias das amostras de Tungstato de Prata (Ag_2WO_4) em sua fase alfa (α)

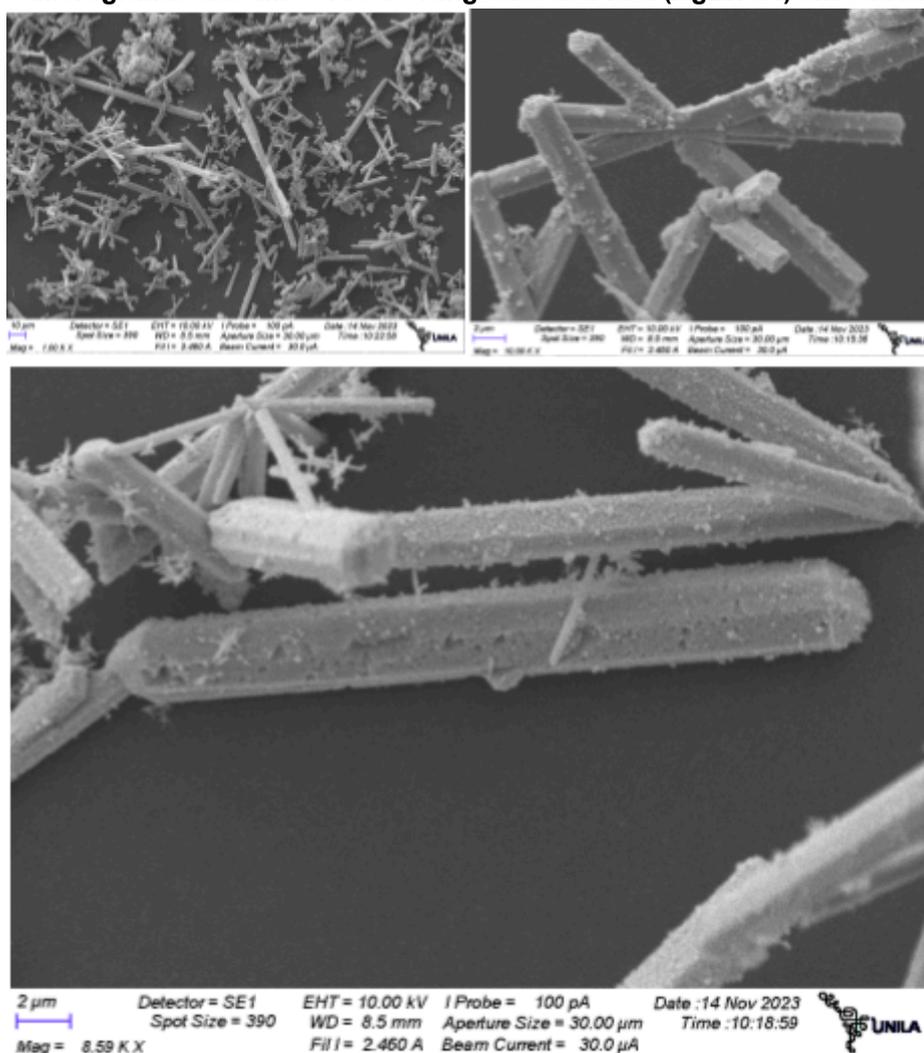


Fonte: O autor (2025).

A **Figura 16** mostra predominantemente bastões com morfologia quadrada e alguns com seção hexagonal, sugerindo variações na estrutura cristalina e no crescimento das partículas. A morfologia influencia diretamente as propriedades antimicrobianas do tungstato de prata. Bastões com diferentes seções têm áreas de superfície distintas, impactando o contato com microrganismos. A forma das partículas também altera a interação com as células microbianas e a liberação de íons de prata, essenciais para o efeito antimicrobiano. Portanto, entender essas formas é crucial para otimizar sua eficácia.

A fase beta, por sua vez, apresenta uma morfologia mais variada (**Figura 17**), refletindo uma estrutura cristalina diversificada que resulta em prismas curtos ou formas tabulares.

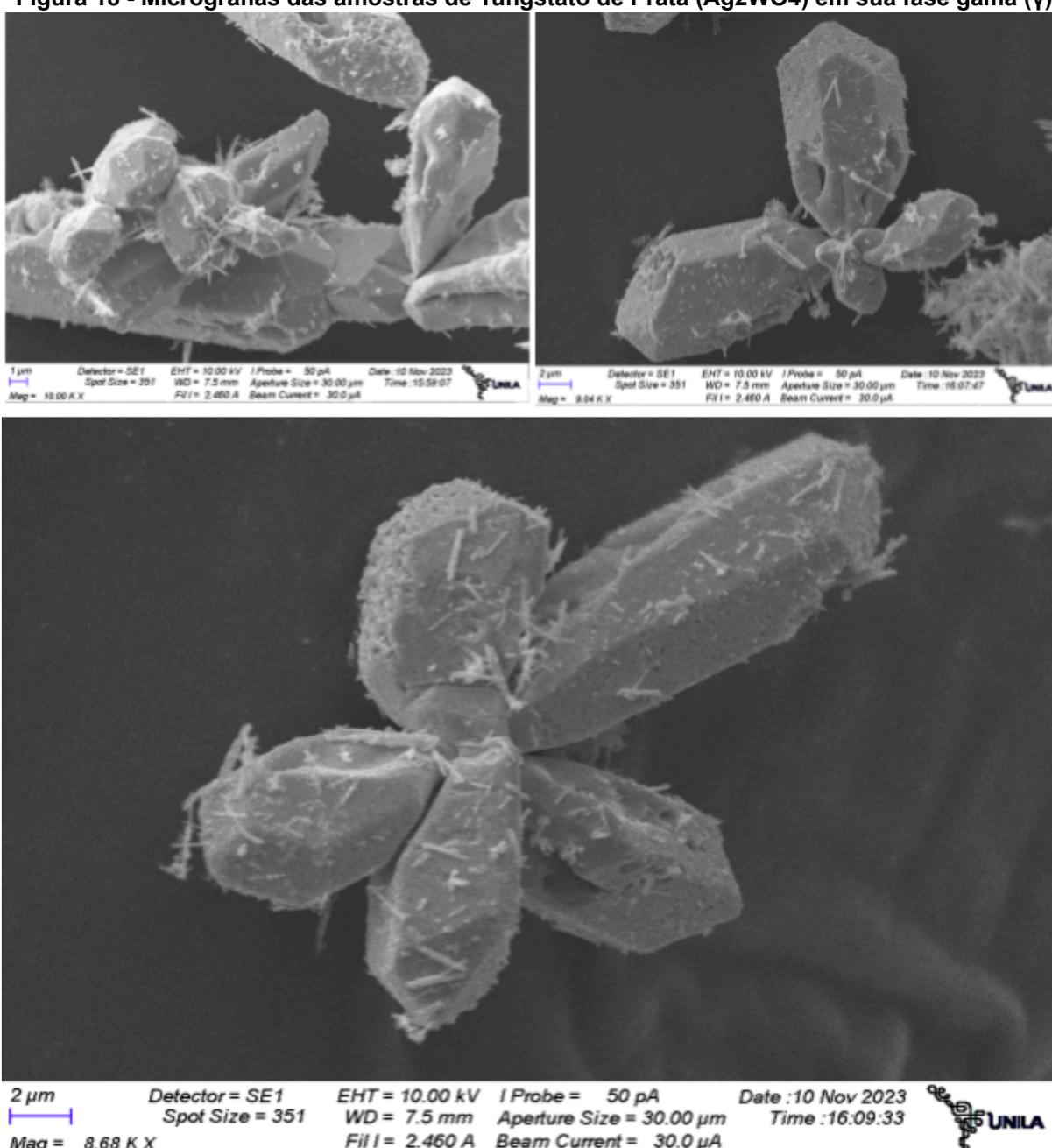
Figura 17 - Micrografias das amostras de Tungstato de Prata (Ag_2WO_4) em sua fase beta (β)



Fonte: O autor (2025).

O tungstato de prata na fase gama (**Figura 18**), apresenta-se predominantemente na forma trapezoidal, sendo composto por cristais com uma estrutura tridimensional que se assemelha a um trapézio, com lados inclinados e uma base mais larga. A morfologia trapezoidal pode ter implicações significativas em suas propriedades físicas e químicas, além de influenciar seu comportamento em várias aplicações.

Figura 18 - Micrografias das amostras de Tungstato de Prata (Ag_2WO_4) em sua fase gama (γ)

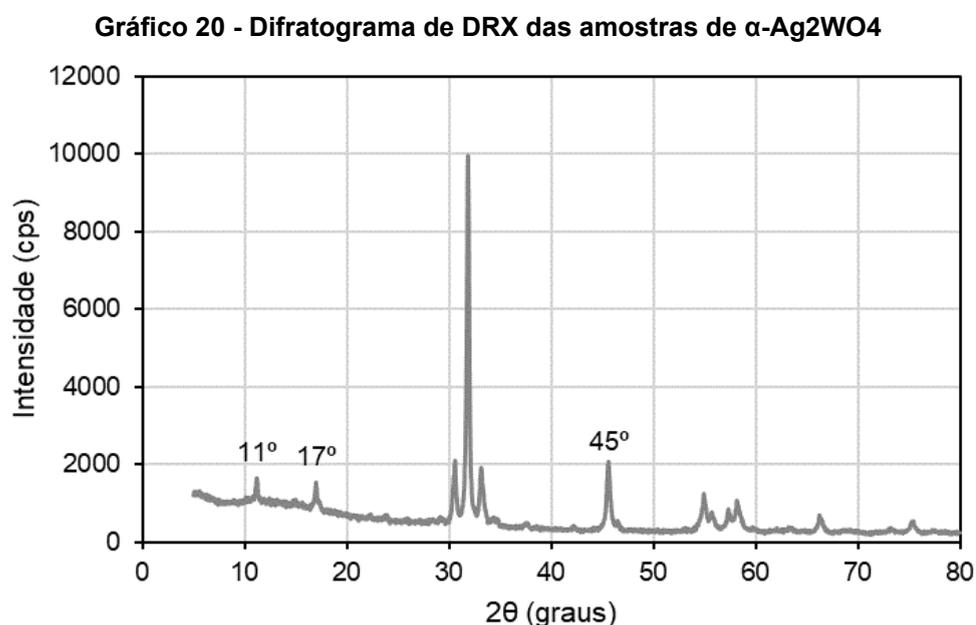


Fonte: O autor (2025).

Diferentemente da amostra alfa do tungstato de prata, os **Figuras 17 e 18** destacam a presença de misturas de fases cristalinas nas amostras beta e gama, sinalizando a presença de características metaestáveis nesses materiais. Isso sugere a existência de estados não tão estáveis quanto à amostra alfa, apontando para a coexistência ou transições entre diferentes estruturas cristalinas, o que é importante para compreender a complexidade das propriedades desses compostos. É relevante salientar que essas descrições morfológicas são representativas das características típicas dessas fases, podendo variar conforme as condições de síntese, métodos de preparação e ambiente de cristalização.

4.3.2 Difratomia de raios X

Os **Gráficos 20, 21 e 22** exibem os Difratogramas de DRX das três formas de cristais Ag_2WO_4 sintetizados pelo método de precipitação.

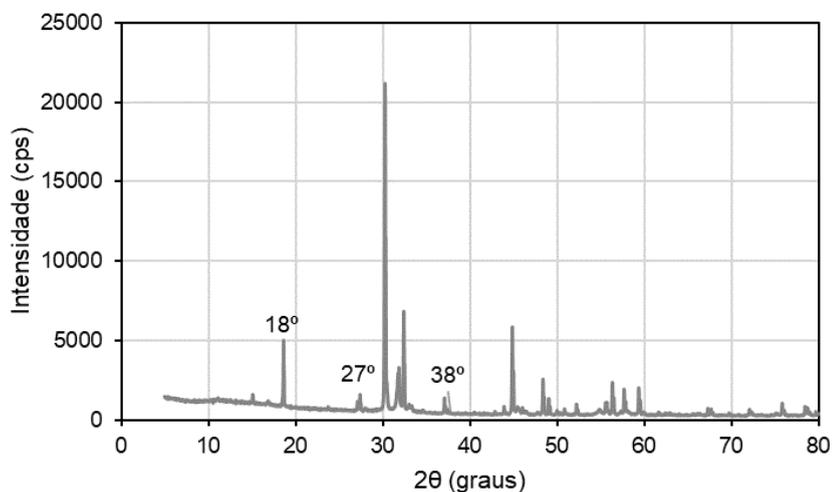


Fonte: O autor (2025).

Os resultados da difratometria evidenciam que o método de síntese empregado na produção do α e $\beta\text{-Ag}_2\text{WO}_4$ (**Gráfico 20**) não conduziu a produtos finais com alta cristalinidade e mesmo com ausência de fases secundárias, pois, ao sintetizar as formas beta e gama, há a presença de fases secundárias, e da

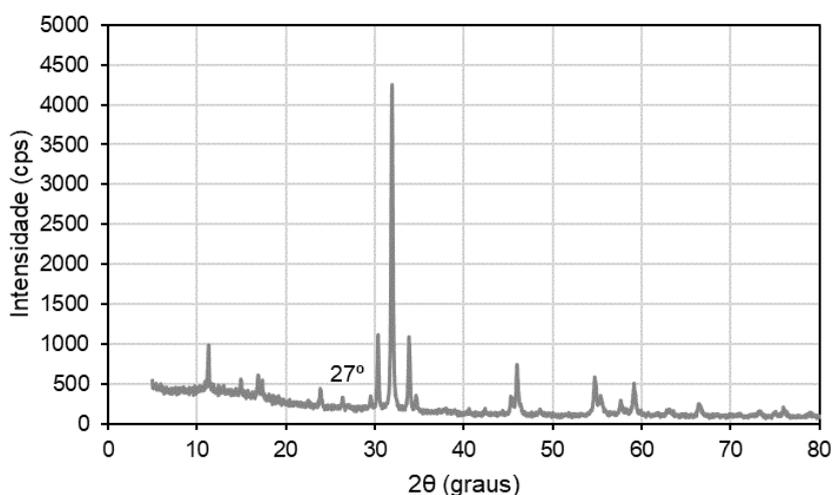
presença de picos característicos da fase alfa ($2\theta = 11^\circ$, 17° e 45°) (Vergani *et al.*, 2021).

Gráfico 21 - Difratoograma de DRX das amostras de β -Ag₂WO₄



Fonte: O autor (2025).

Gráfico 22 - Difratoograma de DRX das amostras de γ -Ag₂WO₄



Fonte: O autor (2025).

De acordo com Foggi *et al.* (2017), o Ag₂WO₄ apresenta polimorfismo, podendo conter as fases alfa (α), beta (β) e gama (γ) em conjunto. Essa mistura de fases sugere que a precipitação à temperatura ambiente, realizada como a primeira etapa da síntese das amostras, não foi suficiente para a formação de uma fase única de tungstato de prata nas formas β e γ .

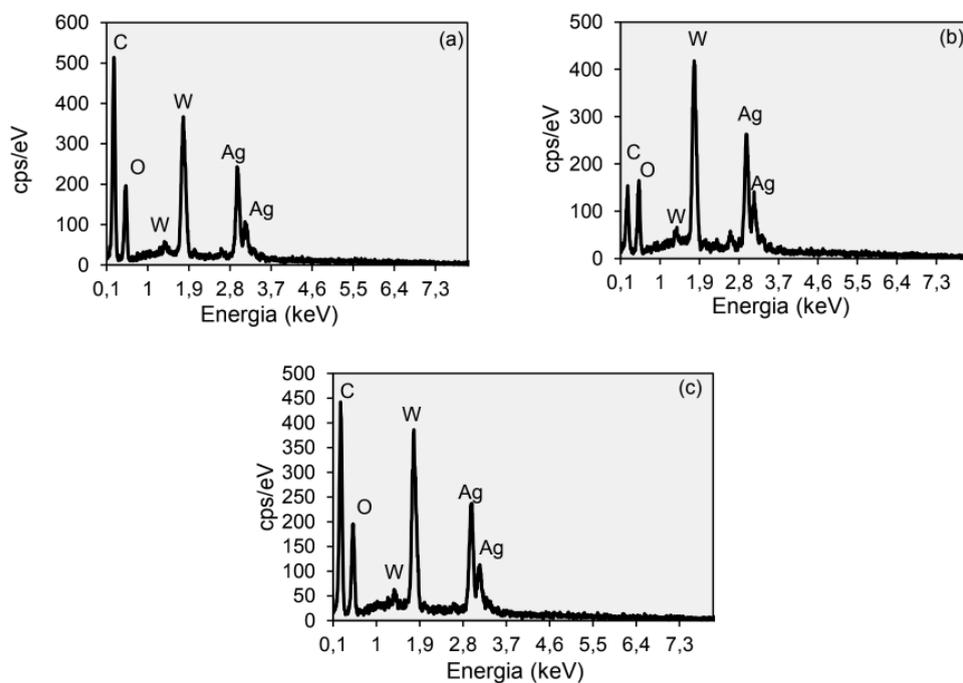
Conforme Roca *et al.* (2017), nas fases β e γ , tem-se um pico de difração relativamente fraco, em $2\theta = 38^\circ$, correspondente ao plano de rede da prata (Ag). Entretanto, esse pico não foi observado nas fases α e γ . Outros picos característicos de Ag, localizados em $2\theta = 45^\circ$, e correspondentes a diferentes planos de rede, foram identificados em todas as amostras, confirmando a presença de prata em uma concentração relativamente alta.

Nos **Gráficos 21** e **22** é possível localizar um pico em $2\theta = 27^\circ$, característico para as fases β e γ . No entanto, para a síntese em beta e gama, a literatura aponta metaestabilidade, com grande tendência de formar a fase α em temperaturas superiores a ambiente ou dependendo o tempo de síntese. Nesse sentido, Pereira (2015) acredita que fatores como temperatura, tempo, pressão e as micro-ondas possam ter favorecido a eliminação da fase intermediária e obtenção de sistemas monofásicos.

4.3.3 Energia dispersiva de raios X

O mapeamento dos elementos químicos foi realizado como técnica complementar à espectroscopia de EDS, com o objetivo de avaliar a distribuição espacial de cada espécie atômica presente em regiões específicas dos materiais. Os resultados estão expressos no **Gráfico 23** e na **Figura 19**.

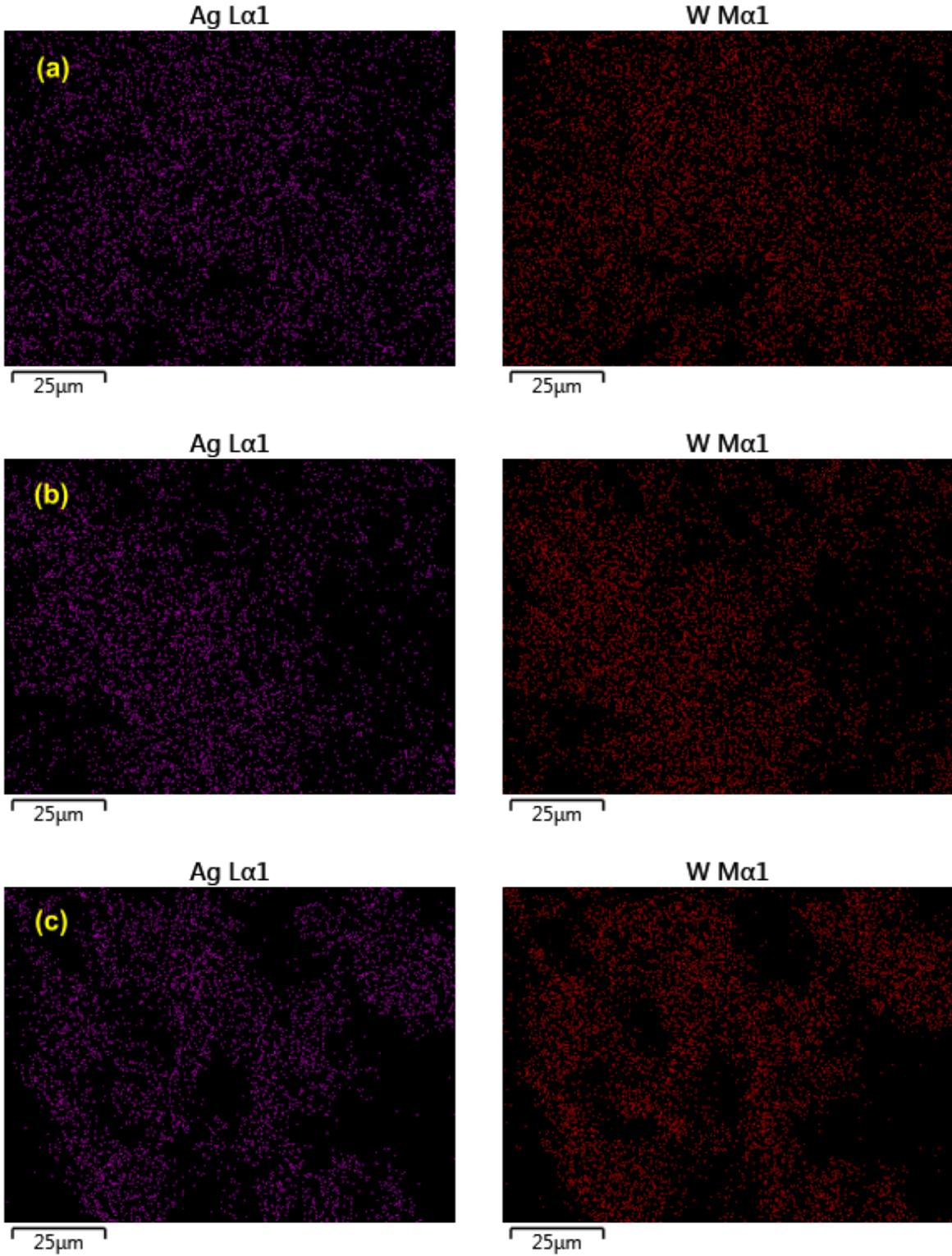
Gráfico 23 - Espectro de EDS para as amostras de tungstato de prata: (a) alfa; (b) beta; (c) gama



Fonte: O autor (2025).

O mapeamento químico elemental (**Figura 19**) indica, através das cores, a dispersão dos componentes químicos nos cristais sintetizados.

Figura 19 - Mapeamento elemental dos constituintes Prata (Ag) e Tungstênio (W) para as amostras de (a) alfa, (b) beta e (c) gama



Fonte: O autor (2025).

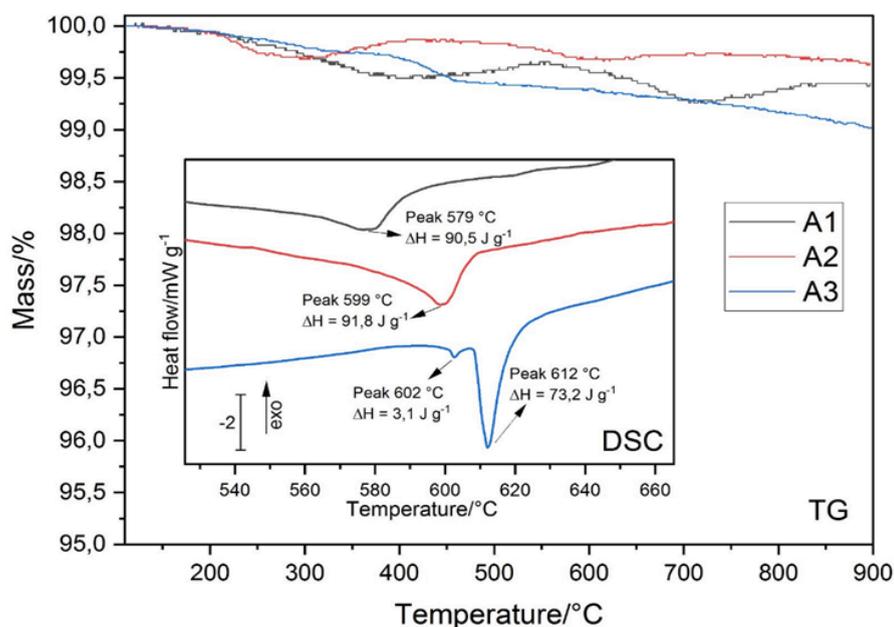
As diferentes fases do tungstato de prata (Ag_2WO_4) podem ter variações na proporção dos elementos constituintes, mas, geralmente, não há uma diferença significativa na concentração de prata entre as fases alfa, beta e gama, conforme observado na **Figura 19**. A estrutura cristalina de cada fase pode influenciar ligeiramente a disposição dos átomos de prata, tungstênio e oxigênio, mas a composição química geralmente permanece a mesma para todas as fases do tungstato de prata.

Ou seja, a relação estequiométrica de átomos de prata para tungstênio permanece 2:1 em todas as fases. Segundo Habibi, Arvand e Asl (2022), a distribuição altamente homogênea de oxigênio, carbono, tungstênio e prata implica na presença predominante de Ag_2WO_4 na forma de bastonetes. Em suma, não é comum encontrar diferenças substanciais na concentração de prata entre as fases alfa, beta e gama do tungstato de prata, já que a proporção entre os elementos constituintes geralmente se mantém constante.

4.3.4 Termogravimetria e calorimetria exploratória diferencial

O **Quadro 30** ilustra as curvas termogravimétricas e de DSC para as amostras sintetizadas, permitindo avaliação detalhada de sua estabilidade térmica.

Quadro 30 - Análise térmica (TGA e DSC) das amostras de Tungstato de Prata. (A1: alfa; A2: beta; A3: gama)



Fonte: O autor (2025).

As análises de termogravimetria (TGA) e calorimetria exploratória diferencial (DSC) foram realizadas com o objetivo de investigar o efeito de diferentes concentrações de reagentes nas propriedades térmicas do Ag_2WO_4 . De acordo com os resultados apresentados, o estudo termogravimétrico das três formas cristalinas de tungstato de prata demonstrou uma significativa estabilidade térmica, como evidenciado pela mínima perda de massa observada entre 25 °C e 900 °C. Esta foi inferior a 1%, indicando uma resistência notável dessas estruturas cristalinas à decomposição ou à evaporação de componentes voláteis.

Por conseguinte, esses achados são fundamentais para compreender as propriedades termoquímicas do tungstato de prata, reforçando sua estabilidade estrutural, que pode oferecer vantagens em diversas aplicações, incluindo o desenvolvimento de materiais na indústria. A robustez térmica observada, posiciona o Ag_2WO_4 como um material promissor para áreas que demandam resistência a altas temperaturas, sem comprometimento de sua integridade. Os resultados obtidos na análise por DSC indicam a ocorrência de um pico endotérmico significativo a aproximadamente 600 °C, com uma entalpia de 90 J/g. Esse pico termal é frequentemente associado a mudanças ou eventos térmicos específicos que ocorrem durante o aquecimento do material.

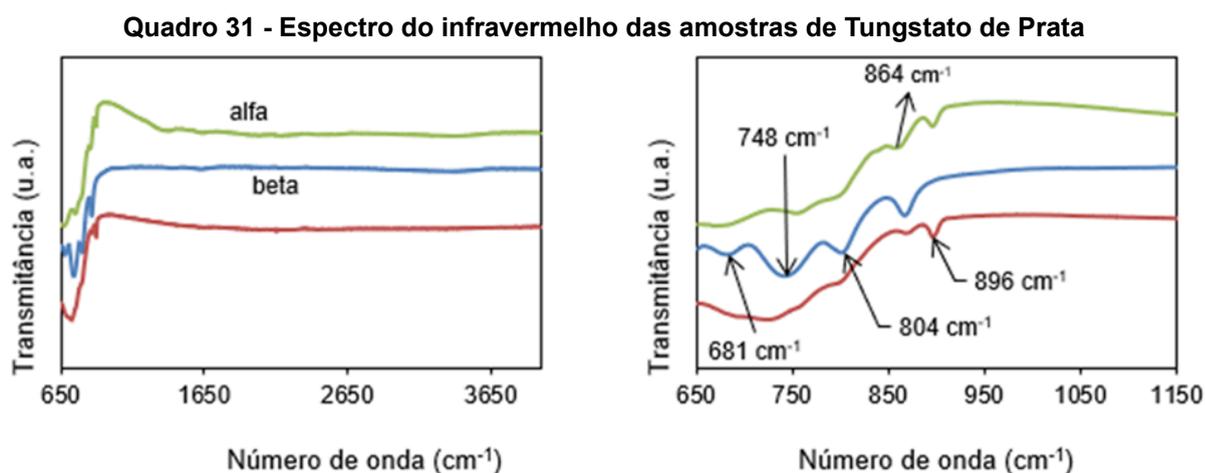
Moura *et al.* (2020), em seus estudos sobre a influência da temperatura sobre o tungstato de prata, concluíram que o β - Ag_2WO_4 passa por várias transformações de fase com mudanças significativas em suas propriedades estruturais e vibracionais, conforme observado pela técnica de espalhamento Raman dependente da temperatura. De acordo com os mencionados autores, as transformações ocorrem de maneira trifásica, mas, em resumo, com o aumento da temperatura, foi constatada a ocorrência de mudança da fase beta para a fase alfa.

A análise dos espectros revelou alterações distintas, como o aparecimento e desaparecimento de bandas Raman, mudanças nos números de onda, variações nas intensidades dos modos Raman e alargamento de banda para todos os modos. Outra observação é de que a fase β não é recuperada durante o resfriamento de 833 a 300 K, sugerindo que as transformações são irreversíveis nesse intervalo de temperatura. Isso pode indicar que a estrutura cristalina original não é restabelecida durante o resfriamento, o que implica em mudanças estruturais permanentes.

É de grande importância estudar as transformações de fase induzidas pela temperatura entre os polígonos de tungstato para estabelecer as relações de fase estáveis e metaestáveis entre diferentes modificações cristalinas, explorar novas fases dos materiais e a origem das instabilidades da rede.

4.3.5 Espectroscopia de absorção na região do infravermelho

A técnica de espectroscopia de absorção na região do infravermelho foi utilizada para identificar as partes constituintes das amostras, com base nas frequências vibracionais específicas da estrutura cristalina desses materiais. O objetivo foi investigar quaisquer alterações potenciais no comportamento das partes constituintes do tungstato de prata, quando sintetizado com diferentes concentrações das substâncias precursoras, conforme exibido no **Quadro 31**.



Fonte: O autor (2025).

De acordo com a literatura, o espectro IR fornece informações sobre o grau de ordem-desordem estrutural das ligações metal-oxigênio. Nota-se, no espectro do infravermelho (**Quadro 31**), a existência de cinco modos ativos. Bandas abaixo de 1000 cm⁻¹ estão normalmente associadas a ligações entre materiais inorgânicos, como metais e oxigênio (Neto, 2022). O **Quadro 31** revela uma banda de absorção intensa em 864 cm⁻¹ para todas as fases cristalinas de Ag₂WO₄. De acordo com Neto (2022) e Adib *et al.* (2021), essa banda é atribuída a vibrações assimétricas das ligações entre W e O, pertencentes ao cluster distorcido de WO₆. As bandas em 748 e 681 cm⁻¹ estão associadas às vibrações entre Ag-O (Neto, 2022).

De acordo com Pereira (2015), a banda em 896 cm^{-1} pode ser atribuída às vibrações das ligações W-O-W presentes em grupos W_2O_8 . Conforme observado por Nobre (2016), a banda em 864 cm^{-1} é característica da fase alfa. Logo, é possível concluir que todas as amostras sintetizadas apresentam cristais da fase alfa, evidenciando que as amostras beta e gama não são totalmente puras. Ainda de acordo com o mesmo autor, a banda em 748 cm^{-1} é característica da fase beta, sendo que apenas uma das amostras apresentou essa absorção mais intensa nessa região.

4.3.6 Teste antimicrobiano para obtenção da Concentração Inibitória Mínima (CIM)

Os resultados obtidos, após a incubação de 24 horas das microplacas para os testes CIM, para as três formas do tungstato de prata, α -alfa, β -beta e γ -gama, são apresentados no **Quadro 32**.

Quadro 32 - Resultados do teste de CIM para α , β e γ -Ag₂WO₄ utilizando E. coli

Fator de concentração	Alfa		Beta		Gama	
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 1	Ensaio 2
0	+	+	+	+	+	+
1	+	+	+	+	+	+
2	+	+	+	+	+	+
4	+	+	+	+	+	+
8	+	+	+	+	+	+
16	+	+	+	+	+	+
32	+	+	-	-	+	+
64	+/-	+/-	+/-	+/-	-	-

(-): Sem proliferação de E. coli; / (+): Proliferação de E. coli; / (+/-): Proliferação parcial de E. coli
Fonte: O autor (2025).

Como pode ser observado, na CIM do α -Ag₂WO₄, houve uma inibição parcial apenas no fator 64 para o β -Ag₂WO₄, apresenta-se uma inibição no fator 32 e γ -Ag₂WO₄ inibiu o crescimento na linha do fator 64, e, para os demais fatores de concentração, houve o crescimento microbiano.

No estudo desenvolvido por Roca *et al.*, (2017), os valores encontrados para os materiais foram $62,5\text{ }\mu\text{g/mL}$, para α -Ag₂WO₄, e $31,25\text{ }\mu\text{g/mL}$, para β e γ do Ag₂WO₄. Mesmo nas concentrações inibitórias, todos materiais apresentaram redução na quantidade de microrganismos quando comparados ao controle. Assim, seria ideal refazer os testes para alfa com valores de concentração $> 32\text{ }\mu\text{g/mL}^{-1}$.

Finalmente, foi proposto por Andrés *et al.* (2015), que o mecanismo plausível dos microcristais de $\alpha\text{-Ag}_2\text{WO}_4$ para a inativação da bactéria *E. coli* envolve a interação direta entre superfícies específicas e celulares, o que afeta a permeabilidade das membranas onde a baixa energia de superfície entra e induz estresse oxidativo nas células bacterianas, resultando, subsequentemente, na inibição do crescimento celular e, por fim, na morte celular.

Para as outras duas formas, houve apenas morte microbiana na concentração de $16 \mu\text{g mL}^{-1}$ para beta (β) e na concentração de $32 \mu\text{g mL}^{-1}$ para gama (γ), observado pela não turbidez dos poços, indicando morte microbiana, ou seja, também aponta uma eficácia a concentrações maiores.

Embora as fases beta e gama tenham apresentado atividade antibacteriana semelhante, no estudo de Vergani *et al.* (2021) é possível observar um maior número de células inibidas na cultura bacteriana tratada com a $\beta\text{-Ag}_2\text{WO}_4$. Sabe-se que os materiais semicondutores, como o Ag_2WO_4 , têm a capacidade de libertar espécies que reagem ao oxigênio. Esses, por sua vez, quando em contato com microrganismos, são responsáveis por danos nas membranas, que os levam à morte.

A capacidade antimicrobiana das fases metaestáveis do Ag_2WO_4 é relatada pela literatura. De acordo com Vergani *et al.* (2021), o $\beta\text{-Ag}_2\text{WO}_4$ foi ligeiramente mais eficaz, necessitando de metade da concentração para a eliminação do *Staphylococcus aureus*. Através da contagem de unidades formadoras de colônias por mililitro (UFC/mL), os autores observaram uma atividade antibacteriana semelhante entre as fases β e γ , as quais, por sua vez, foram superiores à atividade na sua fase α .

Quadro 33 - Resumo dos resultados dos ensaios de atividade antimicrobiana

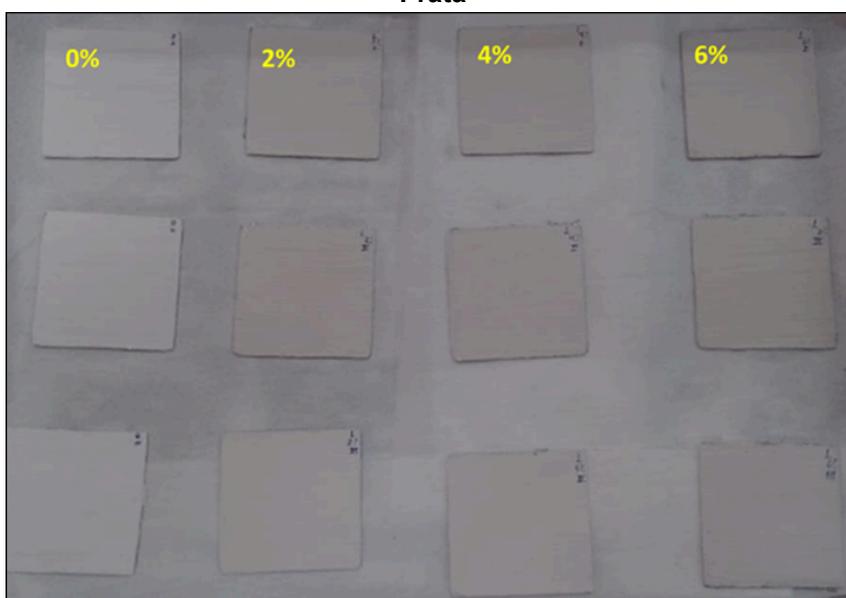
Elementos	CIM ($\mu\text{g/mL}$)
$\alpha\text{-Ag}_2\text{WO}_4$	> 32
$\beta\text{-Ag}_2\text{WO}_4$	16
$\gamma\text{-Ag}_2\text{WO}_4$	32

Fonte: O autor (2025).

4.3.7 Aditivção de tungstato de prata em tinta acrílica

A **Figura 20** exibe os resultados qualitativos dos ensaios de exposição à radiação UV dos revestimentos de tinta acrílica providas de aditivo a base de tungstato de prata. A representação presente na **Figura 20** evidencia a tendência de escurecimento progressivo nos tons de branco dos revestimentos aditivados, em consonância com o incremento gradativo do teor de tungstato de prata.

Figura 20 - Superfícies revestidas com tinta acrílica com e sem aditivo a base de Tungstato de Prata



Fonte: O autor (2025).

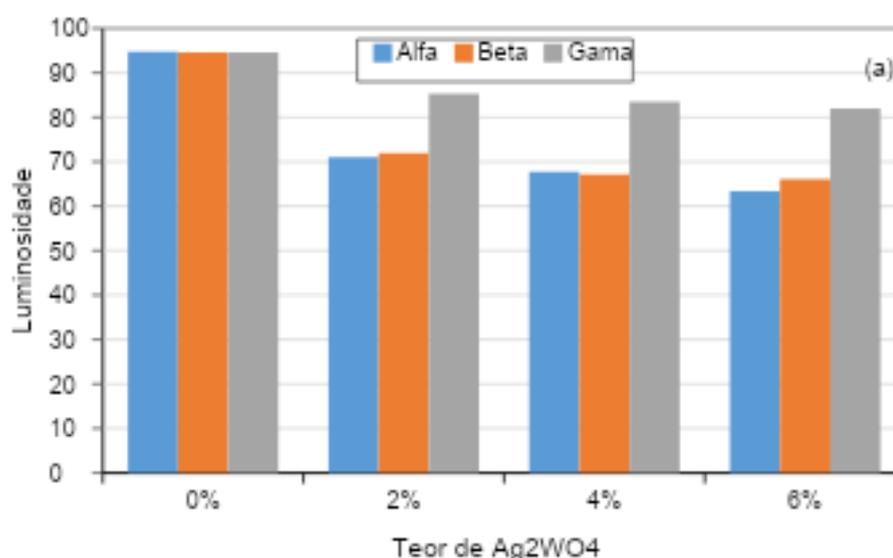
A causa do escurecimento não é totalmente compreendida, mas pode estar relacionada à redução da prata, que pode levar à formação de compostos com colorações diferentes, em tons de marrom ou preto. Essas mudanças na prata podem contribuir para as alterações na cor dos revestimentos, especialmente quando combinadas com os efeitos da presença dos íons de tungstato amarelados.

Segundo Alvarez-Roca *et al.* (2020), esse comportamento pode ser entendido em termos de uma possível captura de alguns elétrons foto excitados por íons Ag^+ , para formar Ag^0 metálico na superfície Ag_2WO_4 , conforme relatado em outro estudo para materiais à base de Ag sob irradiação por feixe de elétrons.

O escurecimento dos revestimentos aditivados com tungstato de prata pode ser um problema em aplicações onde a aparência é importante. No **Gráfico 24**, são apresentados os resultados de alteração do parâmetro da luminosidade da tinta

branca. Conclui-se que os valores de luminosidade, após o ensaio de irradiação, se mostraram diferentes entre as concentrações avaliadas, evidenciando uma correlação negativa, pois observa-se a ocorrência na diminuição da luminosidade (aumento do escurecimento), a partir do aumento de Ag_2WO_4 . Com base nos resultados apresentados no **Gráfico 24**, é possível observar a ausência de incremento na diferença média de contraste de cor, à medida que a concentração de Ag_2WO_4 aumenta.

Gráfico 24 - Valores de luminosidade dos revestimentos de tinta acrílica branca aditivada em diferentes teores de Ag_2WO_4



Fonte: O autor (2025).

A concentração de 0% corresponde à tinta convencional, desprovida de adição de Ag_2WO_4 , enquanto uma concentração de 6% de Ag_2WO_4 , incorporada à tinta convencional, não resultou em aumento da diminuição da cor, em todas as amostras avaliadas para 60 minutos. É possível auferir que esses resultados ocorrem devido à baixa concentração de Ag_2WO_4 ou ao baixo tempo de ensaio.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusão

Conforme a proposta desta dissertação, investigaram-se as propriedades físico-químicas e antimicrobianas do tungstato de prata (Ag_2WO_4) e sua aplicação como aditivo em tintas imobiliárias. Através da síntese e caracterização detalhada dos polimorfos alfa, beta e gama, observou-se variações significativas na eficácia antimicrobiana, estabilidade térmica e propriedades morfológicas dos materiais, proporcionando uma visão abrangente sobre o comportamento de cada fase cristalina. O polimorfo $\beta\text{-Ag}_2\text{WO}_4$ destacou-se por sua elevada eficácia antimicrobiana, apresentando uma Concentração Inibitória Mínima (CIM) de 16 $\mu\text{g/mL}$ contra *Escherichia coli*, valor inferior ao observado nas fases alfa e gama, que requereram concentrações maiores para o mesmo efeito. Esse resultado sugere que a fase beta possui maior capacidade de liberação de íons de prata, fator essencial para a ação antimicrobiana, posicionando-a como a mais promissora para aplicações em revestimentos funcionais.

Além da ação antimicrobiana, o tungstato de prata demonstrou alta estabilidade térmica, conforme revelado por análises de termogravimetria (TGA) e calorimetria exploratória diferencial (DSC), com mínima perda de massa em temperaturas de até 900°C. Essa característica é essencial para aplicações em ambientes que exijam resistência a altas temperaturas e durabilidade. No entanto, verificou-se que a incorporação do Ag_2WO_4 nas tintas ocasionou escurecimento da cor branca, o que representa um desafio para formulações estéticas e pode limitar seu uso em aplicações decorativas.

Os ganhos para a sociedade são evidentes, incluindo a redução da contaminação microbológica em ambientes internos, tornando-os mais seguros e higiênicos. Além disso, o uso desse aditivo pode aumentar a durabilidade das superfícies pintadas, reduzindo a necessidade de manutenção frequente e reaplicação de tinta, o que diminui custos e impactos ambientais. Esse benefício é particularmente relevante para ambientes hospitalares, clínicas e espaços públicos, onde a higiene e a resistência dos revestimentos são fundamentais.

No cenário global, observa-se que Brasil e Estados Unidos lideram as pesquisas e o desenvolvimento de tintas antimicrobianas, com um grande número de patentes registradas. Em contrapartida, a Europa mantém regulamentações ambientais mais rigorosas, o que pode restringir o uso de tintas antimicrobianas que contenham metais pesados, como o tungstato de prata. Esse fator pode explicar a menor quantidade de pesquisas e inovações relacionadas a esse material no continente europeu.

Quanto aos riscos à saúde e ao meio ambiente, a liberação de íons de prata pelo tungstato levanta preocupações quanto à contaminação da água. Estudos adicionais são necessários para avaliar a lixiviação desses compostos e definir medidas adequadas para descarte de resíduos sólidos contendo esse material. Embora a toxicidade para humanos ainda precise de mais investigações, a capacidade do tungstato de prata de liberar espécies reativas de oxigênio exige um monitoramento cuidadoso de seu impacto ambiental.

A viabilidade do tungstato de prata como substituto de biocidas convencionais em tintas imobiliárias está relacionada à sua alta eficácia antimicrobiana e estabilidade térmica. Sua aplicação pode reduzir o uso de compostos químicos agressivos e ampliar as possibilidades de revestimentos funcionais, tornando-o um material estratégico para a indústria de tintas. No entanto, desafios como o escurecimento da tinta e a necessidade de otimizar suas propriedades ainda precisam ser superados para garantir sua aplicação em larga escala.

5.2 Perspectivas para pesquisas futuras

Com base nos resultados deste estudo, recomenda-se que futuras pesquisas explorem as seguintes áreas:

- Expansão dos testes antimicrobianos: avaliar o efeito do tungstato de prata em outras cepas bacterianas e fungos além da *Escherichia coli*, especialmente patógenos de interesse hospitalar e industrial;
- Avaliação antimicrobiana de superfícies: conduzir ensaios conforme a norma JIS Z 2801, envolvendo a inoculação de bactérias (*Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli*), incubação e quantificação da atividade antimicrobiana, visando medir a eficácia do revestimento.; Estabilidade a longo prazo: realizar

estudos sobre a durabilidade do tungstato de prata em tintas ao longo do tempo, simulando condições reais de aplicação e envelhecimento;

- Aplicação em diferentes substratos: testar o tungstato de prata como aditivo antimicrobiano em revestimentos automotivos, hospitalares e industriais, ampliando seu escopo de utilização;
- Minimização dos efeitos estéticos: desenvolver estratégias para reduzir o escurecimento causado pelo tungstato de prata em tintas, preservando sua funcionalidade antimicrobiana sem comprometer a estética.

Essas pesquisas devem contribuir para a consolidação do tungstato de prata como um material avançado para revestimentos funcionais, promovendo novas aplicações e garantindo sua aceitação em diferentes setores da indústria.

REFERÊNCIAS

- ABRAFATI. **Manual do usuário tintas.** Disponível em: <<https://abrafati.com.br/manual-tecnico-de-tintas/mobile/index.html>>. Acesso em: 25 jun. 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12554:** tintas para edificações não industriais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- AMORIM, S. M. **Desenvolvimento de tintas fotocatalíticas com estabilidade aumentada utilizando fotocatalisadores à base de microesferas de dióxido de titânio.** 2017.
- ANDRÉS, J. et al. Facet-dependent photocatalytic and antibacterial properties of α -Ag₂WO₄ crystals: combining experimental data and theoretical insights † ‡. Cite this: Catal. **Sci. Technol**, v. 5, 2014a.
- ANDRÉS, J. et al. Structural and electronic analysis of the atomic scale nucleation of Ag on α -Ag₂WO₄ induced by electron irradiation. **Scientific Reports**, v. 4, n. 1, p. 1–7, 23 jun. 2014b.
- ANDRÉS, J. et al. Structural and electronic analysis of the atomic scale nucleation of Ag on α -Ag₂WO₄ induced by electron irradiation. **Scientific Reports**, v. 4, n. 1, p. 1–7, 23 jun. 2014c.
- ANVISA. AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Tintas com ação saneante.** Disponível em: <https://www.gov.br/anvisa/pt-br/assuntos/regulamentacao/air/analises-de-impacto-regulatorio/2020/25351-904808_2019-27-tintas-com-acao-saneante.pdf/view>. Acesso em: 26 jun. 2024.
- ARIA, M.; CUCCURULLO, C. Bibliometrix: an R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, v. 11, n. 4, p. 959–975, 1 nov. 2017.
- ASSIS, M. et al. Towards the scale-up of the formation of nanoparticles on α -Ag₂WO₄ with bactericidal properties by femtosecond laser irradiation. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, 1 dez. 2018.
- BASTOS, I. S. et al. Silver tungstate microcrystals and their performance over several clinical multidrug resistant microorganisms. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 647, p. 129132, 20 ago. 2022.
- BRASIL. Lei n.º 11.762, de 1º de agosto de 2008. Presidência da República. Disponível em: <https://presrepublica.jusbrasil.com.br/legislacao/93359/lei-11762-08>. Acesso em: 1 dez. 2022.
- BRASIL. **Ministério da Saúde.** Técnica de coloração de Gram. Brasília: Ministério da Saúde, Programa Nacional de Doenças Sexualmente Transmissíveis e AIDS, 2001. 63 p. (Série TELELAB).

BENSCH, K. et al. Cladosporium species in indoor environments. **Studies in Mycology**, v. 89, p. 177–301, 1 mar. 2018.

BI, Y. et al. A facile route to engineer highly superhydrophobic antibacterial film through polymerizable emulsifier. **Progress in Organic Coatings**, v. 133, p. 387–394, 1 ago. 2019.

BOLLMANN, U. E. et al. Leaching of Terbutryn and Its Photodegradation Products from Artificial Walls under Natural Weather Conditions. **Environmental Science and Technology**, v. 50, n. 8, p. 4289–4295, 3 maio 2016.

BOLLMANN, U. E. et al. Biocide Runoff from Building Facades: Degradation Kinetics in Soil. **Environmental Science and Technology**, v. 51, n. 7, p. 3694–3702, 4 abr. 2017.

BOTTELBERGHS, P. H.; EVERTS, E.; BROERS, G. H. J. Phase diagram and high ionic conductivity of the system $\text{Na}_2\text{WO}_4\text{-Ag}_2\text{WO}_4$. **Materials Research Bulletin**, v. 11, n. 3, p. 263–267, 1 mar. 1976.

BURKHARDT, M. et al. Biocides used in building materials and their leaching behavior to sewer systems. **Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research**, v. 56, n. 12, p. 63–67, 2007.

CANAUDE, C. **SBRT**. Disponível em: <<http://www.respostatecnica.org.br/>>. Acesso em: 1 dez. 2022.

CANAUDE, C. **Dossiê técnico: fabricação de tintas**. Rio de Janeiro: Rede de Tecnologia e Inovação, 2007.

CANDAN, Z. et al. Nanocellulose: Sustainable biomaterial for developing novel adhesives and composites. **Industrial Applications of Nanocellulose and its Nanocomposites**, p. 49–137, 1 jan. 2022.

CAVALCANTE, L. S. et al. Cluster coordination and photoluminescence properties of $\alpha\text{-Ag}_2\text{WO}_4$ microcrystals. **Inorganic Chemistry**, v. 51, n. 20, p. 10675–10687, 15 out. 2012.

CHEN, H.; XU, Y. Photoactivity and stability of Ag_2WO_4 for organic degradation in aqueous suspensions. **Applied Surface Science**, v. 319, n. 1, p. 319–323, 15 nov. 2014.

COBO, M. J. et al. An approach for detecting, quantifying, and visualizing the evolution of a research field: a practical application to the Fuzzy Sets Theory field. **Journal of Informetrics**, v. 5, n. 1, p. 146–166, 1 jan. 2011.

CRISTINA, I.; ANGHINETTI, B. **Tintas, suas propriedades e aplicações imobiliárias**. 2012.

DIÁRIO DA REPÚBLICA. Decreto-Lei n.º 112/2010. **Diário da República**, n.º 204, 20 out. 2010. Disponível em: <https://dre.tretas.org/dre/279834/decreto-lei-112-2010-de-20-de-outubro>. Acesso em: 26 jun. 2024

DIAS, P. et al. A nanotecnologia no Brasil e o desenvolvimento de produtos com atividade antimicrobiana. **Química Nova**, v. 44, n. 8, 2021.

DROR-EHRE, A. et al. **Silver nanoparticle-E. coli colloidal interaction in water and effect on E. coli survival**. 2009.

ECHA. EUROPEAN CHEMICALS AGENCY. **Compreendendo o RPB - ECHA**. Disponível em: <https://www.echa.europa.eu/regulations/biocidal-products-regulation/understanding-bpr>. Acesso em: 26 jun. 2024.

ESPANA, Victor Andres Arias; LIU, Yanju; JIT, Joytishna; NAIDU, Ravi. Emerging contaminants in the environment: Risk-based analysis for better management. **Chemosphere**. v. 154, 2016, p.350-357.

EYSSAUTIER-CHUINE, S. et al. A new preventive coating for building stones mixing a water repellent and an eco-friendly biocide. **Progress in Organic Coatings**, v. 120, p. 132–142, 1 jul. 2018.

FAZENDA, J. M. R. **Tintas: ciência e tecnologia**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2009.

FAZENDA, J. M. R. **Tintas: ciência e tecnologia**. ISBN 9788521217657, 852121765X, 2021.

FOGGI, C. C. et al. **Synthesis and evaluation of α -Ag₂WO₄ as novel antifungal agent**. 2017.

GAYLARDE, C. C. et al. Inhibition of Cladosporium growth on gypsum panels treated with nanosilver particles. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 85, p. 57–61, 1 nov. 2013.

GHOSH, S. K. Functional Coatings and Microencapsulation: A General Perspective. **Functional Coatings: by Polymer Microencapsulation**, p. 1–28, 29 jun. 2006.

GOUVEIA, A. F. et al. Ag₂WO₄ as a multifunctional material: Fundamentals and progress of an extraordinarily versatile semiconductor. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 21, p. 4023–4051, 1 nov. 2022.

IPC INPI Publication. Disponível em: <https://ipcpub.wipo.int/?notion=scheme&version=20240101&symbol=C09D0005140000&menulang=en&lang=en&viewmode=f&fipccpc=no&showdeleted=yes&indexes=no&headings=yes¬es=yes&direction=o2n&initial=A&cwid=none&tree=no&searchmode=smart>. Acesso em: 28 maio 2024.

JACOMACI, N. et al. Dielectric Behavior of α - Ag_2WO_4 and its Huge Dielectric Loss Tangent. **Materials Research-Ibero-American Journal of Materials**, v. 22, n. 4, 2019.

KAISER, J. P.; ZUIN, S.; WICK, P. Is nanotechnology revolutionizing the paint and lacquer industry? A critical opinion. **Science of The Total Environment**, v. 442, p. 282–289, 1 jan. 2013.

LONGO, E. et al. Tuning the morphological, optical, and antimicrobial properties of α - Ag_2WO_4 microcrystals using different solvents. **Crystal Growth and Design**, v. 17, n. 12, p. 6239–6246, 6 dez. 2017.

MARDONES, L.; LEGNOVERDE, M.; MONZÓN, J.; BELLOTTI, N.; BASALDELLA, E. Increasing the effectiveness of a liquid biocide component used in antifungal waterborne paints by its encapsulation in mesoporous silicas. **Progress in Organic Coatings**, v. 134, p. 145-152, set. 2019.

MATOS, M. **Uma visão química das tintas imobiliárias e sua questão ambiental**. 2017.

MCKECHNIE, J. S. et al. Silver mono-, di- and tetraungstates. **Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry**, v. 41, n. 2, p. 177–179, 1 jan. 1979.

MERCADO GLOBAL DE REVESTIMENTOS NANOESTRUTURADOS, FILMES E SUPERFÍCIES. Disponível em: <https://www.globenewswire.com/news-release/2021/07/19/2264647/28124/en/Global-Nanostructured-Coatings-Films-and-Surfaces-Market-2021-to-2031-Key-Drivers-Challenges-and-Opportunities.html>. Acesso em: 30 nov. 2022.

MERIGÓ, J. M. et al. Fifty years of Information Sciences: A bibliometric overview. **Information Sciences**, v. 432, p. 245–268, 1 mar. 2018.

MOURA, J. V. B. et al. Temperature-induced phase transitions in metastable β - Ag_2WO_4 : a Raman scattering study. **Vibrational Spectroscopy**, v. 110, p. 103135, 1 set. 2020.

MUKHERJEE, A. et al. Application of smart materials in civil engineering: A review. **Materials Today**: Proceedings, 9 abr. 2021.

MUKHERJEE, A.; DEEPMALA; SRIVASTAVA, P.; SANDHU, J. K. Application of smart materials in civil engineering: a review. **Materiais Hoje**: Processos, 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.03.304.

NGUYEN, T. V. et al. Accelerated degradation of water-borne acrylic nanocomposites used in outdoor protective coatings. **Polymer Degradation and Stability**, v. 128, p. 65–76, 1 jun. 2016.

NOBRE, F. X. et al. **Antimicrobial properties of α - Ag_2WO_4 rod-like microcrystals synthesized by sonochemistry and sonochemistry followed by hydrothermal conventional method**. 2019.

OLAD, A. et al. Preparation and investigation of hydrophilic, photocatalytic, and antibacterial polyacrylic latex coating containing nanostructured TiO₂/Ag⁺-exchanged-montmorillonite composite material. **Applied Clay Science**, v. 123, p. 156–165, 1 abr. 2016.

PARASURAMAN, V. et al. Photocatalytic self-cleaning eco-friendly paint: A unique approach for efficient indoor air pollutant removal and surface disinfection. **Construction and Building Materials**, v. 412, p. 01–16, jan. 2024.

PIMENTA, A. A. et al. A bibliometria nas pesquisas acadêmicas. **Scientia**, v. 4, n. 7, p. 1-13, 2017.

PINATTI, I. M. et al. Structural and photoluminescence properties of Eu³⁺ doped α -Ag₂WO₄ synthesized by the green coprecipitation methodology. **Dalton Transactions**, v. 44, n. 40, p. 17673–17685, 2015.

PIRHASHEMI, M.; HABIBI-YANGJEH, A. Preparation of novel nanocomposites by deposition of Ag₂WO₄ and AgI over ZnO particles: Efficient plasmonic visible-light-driven photocatalysts through a cascade mechanism. **Ceramics International**, v. 43, n. 16, p. 13447–13460, 1 nov. 2017.

PRYE, C. L.; DAUDT, W. H.; HYDE, J. F. **Soluções aquosas de siliconato de amina de metal, composições, veículos de tinta de látex, materiais amorfos, unguentos, graxas, elastômeros, processo para modificar um substrato, e processo para realizar tratamentos antimicrobianos**. US07.04.1981, 1980.

REISS, F. et al. Application, release, ecotoxicological assessment of biocide in building materials and its soil microbial response. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 224, p. 112707, 1 nov. 2021.

ROCA, R. A. et al. **Uncovering the metastable g-Ag₂WO₄ phase: a joint experimental and theoretical study**. 2017.

SALLEH, A. et al. **The potential of silver nanoparticles for antiviral and antibacterial applications: a mechanism of action**. 2020.

SCHIRALDI, A.; PEZZATI, E. Ag, Cu and Na ionic diffusion in the vitreous superionic conductor Ag₆I₄WO₄. **Zeitschrift für Physikalische Chemie**, v. 126, n. 2, p. 217–222, 1 fev. 1981.

ScienceDirect. Czochralski method. **ScienceDirect**, Elsevier, 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/czochralski-method>. Acesso em: 24 fev. 2025.

SCOPUS. **Scopus**: advanced search. Signed in. Disponível em: <https://www-scopus-com.ez48.periodicos.capes.gov.br/search/form.uri?display=advanced>. Acesso em: 4 jul. 2024.

SHIRAKAWA, M. A. et al. Climate as the most important factor determining anti-fungal biocide performance in paint films. **Science of The Total Environment**, v. 408, n. 23, p. 5878–5886, 1 nov. 2010.

SHIRKAVAND, B. H.; ATAEEFARD, M.; FAKHARIZADEH, H. B. Preparation of modified nano ZnO/polyester/TGIC powder coating nanocomposite and evaluation of its antibacterial activity. **Composites Part B: Engineering**, v. 82, p. 190–195, 1 dez. 2015.

SICHINEL, P. C.; SANTOS, R. P. **Produção de tintas ecológicas para o desenvolvimento de ambientes sustentáveis**. v. 1, 2023.

SIM, Y. et al. Oxidative coupling of methane over LaAlO₃ perovskite catalysts prepared by a co-precipitation method: Effect of co-precipitation pH value. **Journal of Energy Chemistry**, v. 35, p. 1–8, 2019.

SOMMESE, F.; BADARNAH, L.; AUSIELLO, G. Smart materials for biomimetic building envelopes: Current trends and potential applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 188, p. 113847, 1 dez. 2023.

SOTTOMAYOR, Maria Catarina Pinto de Rezende de Santiago. **Estudo e Caracterização Microbiológica de Tintas Decorativas Aquosas numa Unidade Industrial de Produção de Tintas**. 2019. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Universidade do Porto (FEUP), Porto.

SOUTO, T.; ALMEIDA, M.; LEAL, V.; MACHADO, J.; MENDES, A. Total Solar Reflectance Optimization of the External Paint Coat in Residential Buildings Located in Mediterranean Climates. **Energies**, v. 13, n. 11, p. 2729, 2020. DOI: 10.3390/en13112729.

TAKAHASHI, T.; IKEDA, S.; YAMAMOTO, O. Solid-State Ionics: A New High Ionic Conductivity Solid Electrolyte Ag₆I₄WO₄ and Use of This Compound in a Solid-Electrolyte Cell. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 120, n. 5, p. 647, 1 maio 1973.

TINTA. **Origem da palavra TINTA**: etimologia. Dicionário Etimológico. Disponível em: <https://www.dicionarioetimologico.com.br/tinta/>. Acesso em: 24 jun. 2024.

VAN DRIEL, B. A. et al. A quick assessment of the photocatalytic activity of TiO₂ pigments - from lab to conservation studio! **Microchemical Journal**, v. 126, p. 162–171, 1 maio 2016.

VAZ, C. D. M. F. **Implementação de métodos de controle de qualidade em tintas**. 2017.

VERGANI, C. E. et al. Selective Synthesis of α -, β -, and γ -Ag₂WO₄ Polymorphs: Promising Platforms for Photocatalytic and Antibacterial Materials. **Inorganic Chemistry**, v. 60, n. 2, p. 1062–1079, 18 jan. 2021.

WEST, G.; LIPPY, B.; COOPER, M.; MARSICK, D.; BURRELLI, L.; GRIFFIN, K.; SEGRAVE, A. Toward responsible development and effective risk management of nano-enabled products in the U.S. construction industry. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 18, n. 11, p. 1-49, 2016.

YILDIRIM, M.; CANDAN, Z. Smart materials: The next generation in science and engineering. **Materials Today: Proceedings**, 24 out. 2023.

ZHU, S.; WANG, D. Photocatalysis: Basic principles, diverse forms of implementations and emerging scientific opportunities. **Advanced Energy Materials**, v. 7, n. 23, 6 dez. 2017.

ZHU, Q. et al. Recent advances in nanotechnology-based functional coatings for the built environment. **Materials today advances**, v. 15, p. 01–24, ago. 2022.