



Etec Prefeito Alberto Feres

**REVESTIMENTOS POLIMÉRICOS ANTIMICROBIANOS:** Aplicação e  
Estudo do Comportamento de Diferentes Substâncias em Microrganismos com  
Ênfase no Sars-CoV-2

Araras – São Paulo

2024



**ETEC Prefeito Alberto Feres**

**REVESTIMENTOS POLIMÉRICOS ANTIMICROBIANOS: Aplicação e  
Estudo do Comportamento de Diferentes Substâncias em Microrganismos com  
Ênfase no Sars-CoV-2**

**ALEX EDUARDO RAYMUNDO  
CHRISTIAN AQUINO LIMA  
GABRIELLI APARECIDA NUNES**

**Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Larissa Fontana**

**Araras – São Paulo**

**2024**



ETEC Prefeito Alberto Feres

**REVESTIMENTOS POLIMÉRICOS ANTIMICROBIANOS:** Aplicação e  
Estudo do Comportamento de Diferentes Substâncias em Microrganismos com  
Ênfase no Sars-CoV-2

ALEX EDUARDO RAYMUNDO

CHRISTIAN AQUINO LIMA

GABRIELLI APARECIDA NUNES

Projeto do Trabalho de Conclusão de  
Curso apresentado ao Componente Curricular –  
Planejamento do TCC em Química do Curso  
Técnico em Química, da ETEC Prefeito  
Alberto Feres.

Araras – São Paulo

2024

## AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho a todos aqueles que, de alguma forma, fizeram parte dessa jornada e contribuíram para a realização deste sonho.

Primeiramente, agradeço a Deus, por estar comigo em cada etapa desta trajetória, desde o início, na aprovação para ingressar no curso, até a conclusão deste TCC. Sua presença me deu força e persistência para superar os desafios e seguir em frente com confiança.

A você, Wellington Gabriel Portes Turatti, dedico estas páginas, pois sua presença transformou profundamente o sentido da minha vida e foi essencial para que este trabalho se tornasse realidade. Agradeço por seu apoio incansável e por me fortalecer nos momentos de dúvida. Esta conquista é tanto sua quanto minha, e seu nome estará eternizado nestas linhas em sinal de eterna gratidão.

Agradeço aos meus colegas do grupo, Alex Eduardo Raymundo e Christian Aquino Lima, que, de uma forma ou de outra, fizeram parte dessa trajetória. Que nossas contribuições, sejam elas grandes ou pequenas, fiquem marcadas como um lembrete de que o trabalho em equipe é uma mistura de habilidades, paciência e, acima de tudo, amizade.

Agradeço também à minha orientadora, Larissa Fontana, pela paciência, pela orientação cuidadosa e por me conduzir pelo caminho certo. Sua dedicação e apoio foram fundamentais para que eu pudesse evoluir e aprimorar cada parte deste trabalho.

Aos professores do curso, meu sincero reconhecimento. Cada um de vocês despertou em mim o amor pela química e marcou minha trajetória de maneira única. Levarei seus ensinamentos e carinho em meu coração, com profunda gratidão.

Enfim, a cada pessoa que direta ou indiretamente esteve ao meu lado, meu mais sincero agradecimento. Esta vitória é de todos nós!

## RESUMO

Este trabalho abordou o desenvolvimento de revestimentos poliméricos inovadores com propriedades antimicrobianas, com ênfase na proteção contra o SARS-CoV-2. A pesquisa é iniciada com uma revisão bibliográfica abrangente, explorando materiais como poliuretano e poliureia, fundamentais para a criação de revestimentos eficazes. O estudo aprofunda-se na configuração do SARS-CoV-2, fornecendo uma base sólida para a compreensão dos desafios envolvidos no desenvolvimento de soluções antimicrobianas específicas para este vírus. A revisão bibliográfica evidencia a importância crucial de desenvolver soluções eficazes e duradouras para a inativação de microrganismos em superfícies de alto contato, especialmente no contexto da pandemia de SARS-CoV-2. Foram destacadas as limitações significativas dos métodos tradicionais de desinfecção em termos de duração da eficácia e resistência à abrasão. Nesse cenário, a aplicação de substâncias virucidas, como sais de amônio quaternário e nanopartículas de óxidos metálicos em polímeros como poliureia e poliuretano, emerge como uma alternativa promissora para revestimentos antimicrobianos de longa duração. Como culminância do estudo, apresentaram-se propostas inovadoras para revestimentos poliméricos, incluindo a incorporação de nanopartículas em polímeros base, o uso de poliuretano com nanopartículas metálicas, combinações de poliuretano e quitosana, e a viabilidade da poliureia verde e discutiram-se técnicas de aplicação por spray e a importância do uso de agentes biocompatíveis e atóxicos. Conclui-se o trabalho explorando combinações inovadoras de materiais, visando desenvolver soluções eficazes e seguras para combater a propagação de microrganismos em diversas superfícies.

**Palavras-chave:** Revestimento, antimicrobiano, SARS-CoV-2, nanopartículas e microrganismos

## ABSTRACT

This work addresses the development of innovative polymeric coatings with antimicrobial properties, focusing especially on protection against SARS-CoV-2. The research begins with a comprehensive literature review, exploring materials such as polyurethane and polyurea, which are fundamental for creating effective coatings. The study delves into the configuration of SARS-CoV-2, providing a solid foundation for understanding the challenges involved in developing specific antimicrobial solutions for this virus. The research advances into the field of nanotechnology, investigating the use of nanoparticles in antimicrobial coatings. The properties and applications of metal oxides, silver nanoparticles, zinc oxide, and copper I and II oxides are examined, emphasizing their synergistic potential when combined with base polymers. Finally, the work presents innovative proposals for polymeric coatings, including the incorporation of nanoparticles into base polymers, the use of polyurethane with metallic nanoparticles, combinations of polyurethane and chitosan, and the feasibility of green polyurea. Spray application techniques and the importance of using biocompatible and non-toxic agents are also discussed. The study concludes by exploring innovative combinations of materials, aiming to develop effective and safe solutions to combat the spread of microorganisms on various surfaces.

**Keywords:** Coating, antimicrobial, SARS-CoV-2, nanoparticles and microorganisms.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 ATIVIDADE ANTIMICROBIANA .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2 REVESTIMENTOS .....</b>	<b>18</b>
<b>2.3 REVESTIMENTOS COM PROPRIEDADES ANTIMICROBIANAS .....</b>	<b>18</b>
<b>2.4 REVESTIMENTOS/POLÍMEROS BASE.....</b>	<b>18</b>
2.4.1 POLIURETANO EXPANDIDO .....	18
2.4.2 POLIUREIA .....	21
<b>2.5 CONFIGURAÇÃO DO SARS-CoV-2 .....</b>	<b>23</b>
<b>2.6 AGENTES ANTIMICROBIANOS.....</b>	<b>25</b>
2.6.1 AMÔNIO QUATERNÁRIO.....	25
2.6.2 CLORETO BENZALCÔNICO.....	26
2.6.3 MECANISMO DE AÇÃO E ESTUDO DE CASO .....	27
2.6.4 QUITOSANA.....	29
2.6.5 NANOTECNOLOGIA E NANOPARTÍCULAS .....	32
<b>2.7 POSSÍVEIS COMBINAÇÕES REVESTIMENTO/AGENTE .....</b>	<b>42</b>
<b>2.8 EFEITO DAS NANOPARTÍCULAS EM REVESTIMENTOS .....</b>	<b>43</b>
2.8.1 BENEFÍCIOS DA INCORPORAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS .....	43
2.8.2 MECANISMO DE AÇÃO DAS NANOPARTÍCULAS NO CONTROLE MICROBIANO .....	47
2.8.3 IMPACTO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E NA DURABILIDADE	
49	
2.8.4 PERSPECTIVAS E DESAFIOS NA APLICAÇÃO .....	49
2.8.5 EFICÁCIA CONTRA O SARS-COV-2 .....	50
<b>2.9 EFEITO DO AMÔNIO QUATERNÁRIO EM REVESTIMENTOS.....</b>	<b>51</b>
2.9.1 MECANISMO DE AÇÃO E EFICÁCIA DOS QAS .....	51
2.9.2 APLICAÇÕES E DESEMPENHO DOS REVESTIMENTOS .....	52

2.9.3	Relevância na Saúde Pública e Prevenção de Infecções .....	53
<b>2.10</b>	<b>EFEITOS DA QUITOSANA COMO AGENTE E REVESTIMENTO .....</b>	<b>54</b>
2.10.1	A APLICAÇÃO DOS REVESTIMENTOS A BASE DE QUITOSANA.....	55
2.10.2	QUESTÕES AMBIENTAIS ENVOLVENDO A QUITOSANA .....	56
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>57</b>
<b>3.1</b>	<b>LIMITE DE COMBINAÇÕES EM REVESTIMENTOS antimicrobianos .....</b>	<b>57</b>
<b>3.2</b>	<b>análise E ESTUDO DE CASO.....</b>	<b>58</b>
<b>3.3</b>	<b>ESCOLHA DO REVESTIMENTO polimérico .....</b>	<b>58</b>
3.3.1	EFICÁCIA E QUALIDADE DO REVESTIMENTO .....	59
<b>3.4</b>	<b>ESCOLHA DO AGENTE ANTIMICROBIANO.....</b>	<b>59</b>
3.4.1	AGENTES ANTIMICROBIANOS “HÍBRIDOS” .....	60
3.4.2	NANOCOMPÓSITO DE NANOPARTÍCULAS E QUITOSANA .....	61
<b>3.5</b>	<b>COMPOSIÇÃO COMPLETA DO REVESTIMENTO ANTIMICROBIANO.....</b>	<b>61</b>
<b>3.6</b>	<b>DETALHES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>64</b>
<b>4.</b>	<b>PESQUISAS E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>64</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>66</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>67</b>



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> (Adaptado: Microbe Investigations Ag, 2012-2020), Esquema de teste de atividade antibacteriana pelo padrão modificado ISO 22196. ....	17
<b>Figura 2.</b> Esquema geral da síntese de poliureia. ....	22
<b>Figura 3.</b> Representação esquemática da estrutura do SARS-CoV-2. ....	24
<b>Figura 4.</b> Estrutura geral dos compostos QACs. ....	26
<b>Figura 5.</b> Estrutura Química do Cloreto de Benzalcônio. ....	27
<b>Figura 6.</b> Modo de ação dos QUATs contra as membranas fosfolipídicas de bactérias e vírus. As esferas vermelhas representam átomos de nitrogênio positivamente carregados. (Extraído e adaptado) .....	28
<b>Figura 7.</b> Reação de N-desacetilação da quitina em condições alcalina. ....	29
<b>Figura 8.</b> Representação dos principais mecanismos de ação das quitosanas frente a microrganismos. ....	31
<b>Figura 9.</b> Representação da escala nanométrica. ....	33
<b>Figura 10.</b> Interação entre a nanopartícula e célula bacteriana. ....	35
<b>Figura 11.</b> Nanopartículas de prata escaneadas por MEV.....	36
<b>Figura 12.</b> Representação da estrutura cristalina de forma hexagonal do ZnO como Wurtzita. Esferas amareladas representam os átomos de zinco e as esferas brancas os átomos de oxigênio. ....	37
<b>Figura 13.</b> Imagens obtidas por MEV-FEG (A) e por MET (B) das nanopartículas de óxido de zinco produzidas pelo método poliol.....	38
<b>Figura 14.</b> Imagens de Microscopia Eletrônica de Transmissão de Varredura (STEM) de ZnO-NP-45 (A, B) e ZnO-NP-76 (C, D) .....	39
<b>Figura 15.</b> Imagens de Microscopia Eletrônica de Transmissão de Varredura (STEM) de ZnO-NP-45 (A, B) e ZnO-NP-76 (C,D) .....	40
<b>Figura 16.</b> Imagem microscópica da transmissão de células infectadas com Sars-CoV-2 e tratadas com nanopartículas de óxido de ferro. ....	44
<b>Figura 17.</b> Representação da influência virucida das nanopartículas de ouro no vírus do sarampo.....	46
<b>Figura 18.</b> Imagem de biofilme LIVE/DEAD dos revestimentos de poliureia com (A) nano-ZnO, (B) La/ZnO, (C) Ce/ZnO, (D) Pr/ZnO, (E) Gd/ZnO e (F) poliureia pura no reator CDC com E. coli.....	48

<b>Figura 19.</b> Imagem de biofilme LIVE/DEAD dos revestimentos de poliureia com (A) nano-ZnO, (B) La/ZnO, (C) Ce/ZnO, (D) Pr/ZnO, (E) Gd/ZnO e (F) poliureia pura no reator .....	48
<b>Figura 20.</b> Composição da bicamada lipídica das membranas celulares, destacando a disposição dos fosfolipídios e proteínas. ....	52
<b>Figura 21.</b> Fluxograma explicativo, que indica a inibição de biofilmes em superfícies de poliuretano com QAS. ....	53
<b>Figura 22.</b> Aplicação das fórmulas dos revestimentos de poliuretano a base de água em uma superfície de acrílico.....	63

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> (Adaptado) Fórmulas para a composição de um revestimento antimicrobiano auto desinfetante.....	62
---	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>ADBAC</b>	Cloreto de aquil-benzil-dimetilamônio
<b>AgNO<sub>3</sub></b>	Nitrato de Prata
<b>Ag<sub>2</sub>O</b>	Óxido de Prata
<b>ANVISA</b>	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
<b>BAC</b>	Cloreto de benzalcônio
<b>BRO</b>	Brometo de p-bromodomifeno
<b>Ce</b>	Cério
<b>CDC</b>	Centros de Controle e Prevenção de Doenças
<b>CPC</b>	Cetilpiridínio
<b>CoVs</b>	Coronavírus
<b>CuO</b>	Óxido de Cobre
<b>DNA</b>	Ácido dextrribonucléico
<b>EROs</b>	Espécies Reativas de Oxigênio
<b>EPD</b>	Deposição eletroforética
<b>GA</b>	Grau Médio de acetilação
<b>Gd</b>	Gadolínio
<b>GlcN</b>	2-amino-2-desoxi-D-Glucopiranosose
<b>GlcNAc</b>	2-acetamido-2-desoxi-D-Glucopiranosose
<b>HDI</b>	Hexametileno diisocianato
<b>HPA-CS</b>	Ácido hidroxipropanóico
<b>HTCC</b>	Cloreto de quitosana N-(2-hidroxipropil)-3-trimetilamônio
<b>HIV</b>	Vírus da Imunodeficiência Humana
<b>ISO</b>	Organização Internacional de Padronização
<b>La</b>	Lantânio
<b>MDI</b>	Difenilmetano Disocianato
<b>MM</b>	Massa molar média
<b>MEV-FEG</b>	Microscopia Eletrônica de Varredura com Fonte de Emissão de Campo
<b>MET</b>	Microscopia Eletrônica de Transmissão
<b>NaBH<sub>4</sub></b>	Boridreto de sódio
<b>NH<sub>2</sub></b>	Amina
<b>NH<sub>3</sub></b>	Amônia

<b>NHDF</b>	Normal Human Dermal Fibroblasts
<b>NP</b>	Nanopartícula
<b>CaO</b>	Óxido de Cálcio
<b>MgO</b>	Óxido de Magnésio
<b>PDI</b>	Índice de polidispersão
<b>pH</b>	Potencial hidrogeniônico
<b>Pr</b>	Praseodímio
<b>PKa</b>	Potencial de dissociação ácida
<b>PU</b>	Poliuretano
<b>PVA</b>	Poliálcool vinílico
<b>QUAT</b>	Amônio Quaternário
<b>RNA</b>	Ácido Ribonucleico
<b>SARS-CoV-2</b>	Síndrome Respiratória Aguda Severa do Coronavírus 2
<b>STEM</b>	Microscopia Eletrônica de Transmissão de Varredura
<b>TCO</b>	Óxidos condutores transparentes
<b>TiO2</b>	Dióxido de titânio
<b>UTIs</b>	Unidades de Terapia Intensiva
<b>UV</b>	Ultravioleta
<b>VOCs</b>	Compostos Orgânicos Voláteis
<b>ZnO</b>	Óxido de Zinco

## **PROBLEMÁTICA**

- A pandemia de COVID-19 evidenciou a necessidade de novas estratégias para impedir a transmissão do vírus SARS-CoV-2, especialmente em superfícies de contato frequente tocadas. Estudos mostram que, apesar da eficácia de desinfetantes convencionais, esses produtos têm ação temporária, o que demanda soluções de proteção mais duradouras (Tiwari, 2018; Montoro et al., 2020). Nesse contexto, o desenvolvimento de revestimentos poliméricos com propriedades antivirais tem sido amplamente investigado, e diversas substâncias químicas têm mostrado potencial para inativação viral. Contudo, há uma vasta gama de opções de substâncias e polímeros, cada uma com diferentes características e efeitos. Diante disso, a questão central é: quais são as substâncias químicas mais eficazes na composição de revestimentos poliméricos com ação antimicrobiana e antiviral, e como essas substâncias têm sido aplicadas para a prevenção do SARS-CoV-2?

## **OBJETIVO GERAL**

- Avaliar as substâncias químicas aplicadas em revestimentos poliméricos com propriedades antimicrobianas, através de uma revisão de literatura científica, com foco na prevenção da transmissão do SARS-CoV-2.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar uma revisão bibliográfica abrangente sobre as substâncias químicas;
- Identificar as principais substâncias virucidas.
- Analisar as metodologias de aplicação desses revestimentos
- Comparar os diferentes tipos de polímeros utilizados como base;
- Discutir as tendências e inovações na área de revestimentos antimicrobianos;

## JUSTIFICATIVA

A pandemia de COVID-19, causada pelo SARS-CoV-2, evidenciou a necessidade urgente de novas estratégias para mitigar a transmissão do vírus, especialmente em superfícies de contato frequente. A disseminação por meio de superfícies contaminadas tornou-se uma preocupação significativa em ambientes coletivos, como hospitais, transportes públicos, escolas e áreas comerciais (Montoro et al., 2020). Embora produtos de limpeza tradicionais sejam úteis, sua ação é limitada e rapidamente inativada após a aplicação (Tiwari, 2018). Dessa forma, tornou-se evidente a necessidade de soluções de proteção mais duradouras e eficazes.

Nesse contexto, o desenvolvimento de revestimentos antimicrobianos aplicados a polímeros emerge como uma alternativa promissora. Revestimentos contendo substâncias químicas como sais de amônio quaternário, nanopartículas de óxidos metálicos (como zinco e prata) e polímeros com propriedades antimicrobianas têm demonstrado potencial para inativar patógenos de maneira prolongada e resistente à abrasão (Liu et al., 2021; Silva, 2021). Esses materiais podem ser aplicados em superfícies de alto contato, proporcionando proteção contínua e eficaz contra o SARS-CoV-2 e outros microrganismos.

Considerando a relevância do tema e a crescente necessidade de inovação para o controle da pandemia, este trabalho justifica-se pela importância de reunir e avaliar as substâncias químicas aplicadas em revestimentos poliméricos com ação antimicrobiana. Ao analisar os estudos mais recentes sobre esses materiais, espera-se contribuir para o avanço das tecnologias de revestimento, auxiliando na redução da disseminação de patógenos e promovendo maior segurança em espaços de uso coletivo.

Além disso, a implementação de revestimentos antimicrobianos pode ter um impacto significativo na saúde pública, não apenas no contexto da COVID-19, mas também na prevenção de futuras pandemias e infecções hospitalares. A pesquisa e desenvolvimento nessa área podem levar a soluções sustentáveis e de longo prazo, beneficiando a sociedade como um todo.

## **1. INTRODUÇÃO**

A pandemia de COVID-19, causada pelo vírus SARS-CoV-2, trouxe desafios sem precedentes à saúde pública mundial, resultando em mais de 675 mil mortes apenas no Brasil até 2022 (WHO, 2022). Entre as formas de transmissão do vírus, o contato com superfícies contaminadas emergiu como um fator de grande preocupação, especialmente em ambientes de uso coletivo (Montoro et al., 2020). Nesse contexto, os revestimentos antimicrobianos ganharam destaque como uma solução promissora para reduzir a propagação de patógenos em superfícies frequentemente tocadas.

A aplicação de substâncias químicas com propriedades antimicrobianas em revestimentos poliméricos representa uma abordagem inovadora para conter a transmissão do SARS-CoV-2 (Liu et al., 2021). Compostos como sais de amônio quaternário e nanopartículas de óxidos metálicos, como óxido de zinco e prata, têm demonstrado eficácia na inativação do vírus em diversos estudos (Silva, 2021; Katloulkal et al., 2023). Quando incorporados a polímeros como poliureia e poliuretano esses materiais podem formar filmes protetores capazes de prevenir infecções em superfícies de contato constante.

Este trabalho de revisão bibliográfica tem como objetivo avaliar os avanços na utilização de revestimentos antimicrobianos na prevenção da COVID-19, com foco nas substâncias químicas aplicadas em revestimentos poliméricos. Por meio da análise de estudos recentes, busca-se compreender a eficácia dessas tecnologias no combate à disseminação do SARS-CoV-2 e explorar novas perspectivas para o desenvolvimento de revestimentos com ação prolongada e segura.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Os revestimentos antimicrobianos emergem como uma grande inovação no mercado biotecnológico, pois apresentam uma solução a um recorrente e coletivo problema: a contaminação. Desse modo, esta seção busca fornecer fundamentos teóricos relevantes para um bom entendimento deste trabalho como um todo.

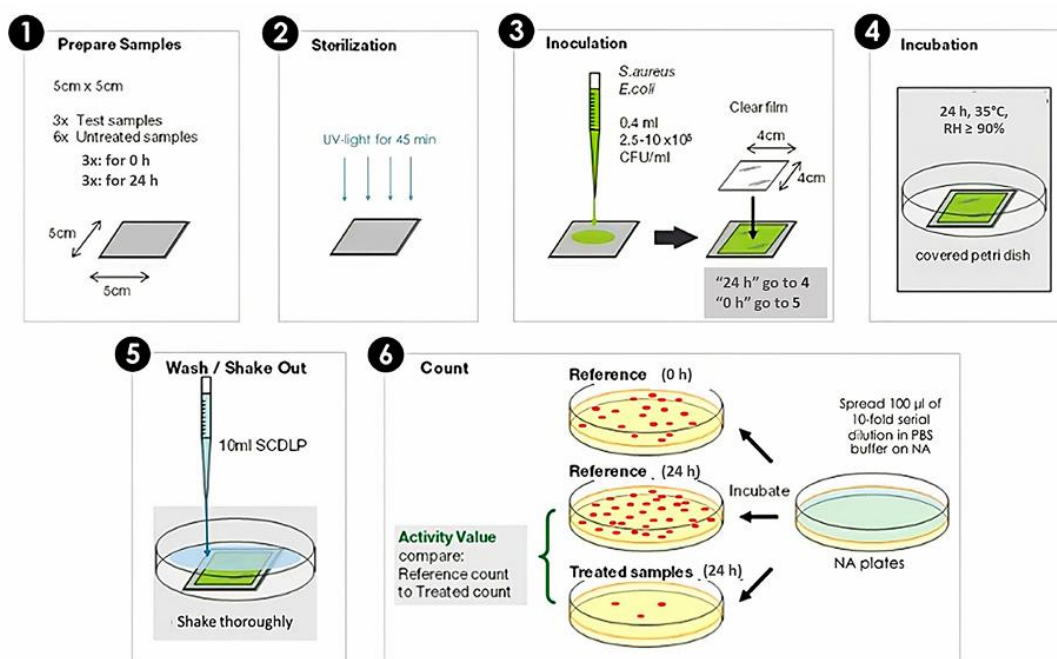


## 2.1 ATIVIDADE ANTIMICROBIANA

Com o decorrer do século 20, houve um decréscimo nos índices de mortalidades por doenças infecciosas, que foi atribuída ao uso de agentes antimicrobianos. Porém, a resistência aos antibióticos tem atingido, nos dias de hoje a criticalidade, tornando ineficaz o seu uso clínico. A evolução da resistência continua e ameaça a saúde humana, que se torna cada vez mais propícia a ser alvo de infecções graves (Santana, V, S, 2012).

A atividade antimicrobiana pode ser mensurada através de uma bateria de testes que, porém, dentre eles se encontra a ISO 22196, que se dedica ao teste de atividade antimicrobiana. (Siritongsuk et al., 2022). Na figura abaixo é possível se obter um passo a passo do procedimento necessário para a realização do teste:

**Figura 1.** (Adaptado: *Microbe Investigations Ag, 2012-2020*), Esquema de teste de atividade antibacteriana pelo padrão modificado ISO 22196.



**Fonte:** Siritongsuk et al., 2022

A realização destes testes cria uma confiança nos agentes antimicrobianos a serem testados, principalmente após sua aplicação em um revestimento. O mesmo pode ser feito com cepas

virais, em específico a Sars-CoV-2, porém com técnicas diferentes e procedimentos mais avançados.

## **2.2 REVESTIMENTOS**

Revestimento é uma camada aplicada sobre a superfície de uma estrutura com o objetivo de proteger, decorar, ou conferir propriedades específicas ao substrato subjacente. Ele pode ser utilizado em diversos contextos, como na construção civil, na indústria automotiva, na biomedicina, em móveis, entre outros.

## **2.3 REVESTIMENTOS COM PROPRIEDADES ANTIMICROBIANAS**

A propriedade antimicrobiana dos revestimentos é especialmente relevante em contextos em que a higiene e a prevenção de infecções são cruciais. Revestimentos com essa propriedade são frequentemente utilizados em superfícies de contato frequente, como bancadas, pisos, e paredes em hospitais, laboratórios, cozinhas industriais, e até mesmo em áreas residenciais, como banheiros. Eles são formulados para manter a eficácia antimicrobiana ao longo do tempo, mesmo após repetidas limpezas e uso contínuo. Revestimentos deste tipo serão mais bem abordados nos tópicos posteriores.

## **2.4 REVESTIMENTOS/POLÍMEROS BASE**

Os tipos de revestimentos bases, ou polímeros bases, serão discutidos de forma ampla abaixo, destacando assim suas propriedades, características interessantes para casos de uso, entre outros.

### **2.4.1 POLIURETANO EXPANDIDO**

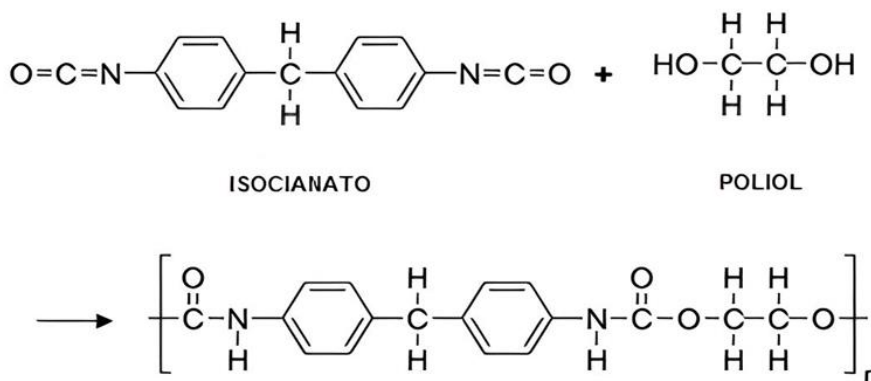
O poliuretano (PU) é um polímero versátil, amplamente utilizado na indústria devido à sua capacidade de adaptação em diferentes formas, como espumas rígidas e flexíveis, elastômeros, adesivos e revestimentos. Sua síntese ocorre pela reação entre isocianatos e polióis, formando ligações uretânicas. A diversidade de propriedades do poliuretano está

diretamente ligada à variação nos tipos de isocianatos e polióis utilizados, bem como aos aditivos incorporados durante sua produção (MIRANDA, V. D., 2023).

#### 2.4.1.1 SÍNTESE E ESTRUTURA

A reação de síntese do PU, conhecida como "one shot", consiste na mistura de todos os componentes em uma única etapa, facilitando a produção em larga escala. A estrutura resultante pode ser ajustada de acordo com o tipo de isocianato e poliól, o que permite o desenvolvimento de materiais desde espumas flexíveis, usadas em colchões e estofados, até espumas rígidas, empregadas em isolamento térmico de construções e eletrodomésticos. A Figura 1 apresenta o esquema de síntese do PU a partir de isocianato e poliól.

**Figura 1:** Esquema de síntese de poliuretano a partir de um isocianato e um poliól (Adaptado de Das & Mahanwar, 2020).



Fonte: (MIRANDA, V. D., 2023).

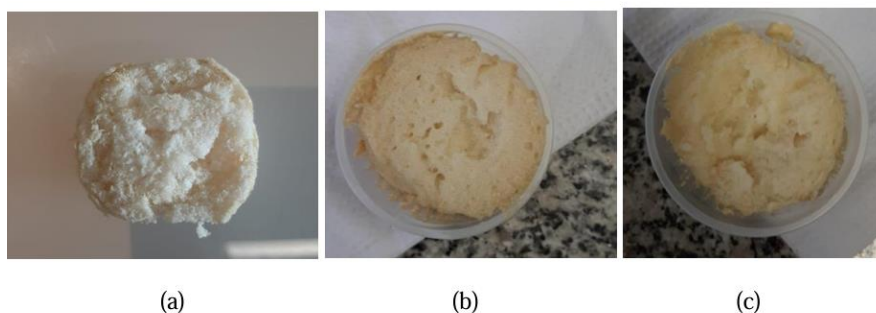
#### 2.4.1.2 AVANÇOS NA SUSTENTABILIDADE

Com o aumento da demanda por soluções mais sustentáveis, a substituição de polióis de origem petroquímica por aqueles derivados de fontes renováveis, como óleos vegetais, tem sido uma estratégia relevante para a produção de PU. Óleos de palma, soja e linhaça são frequentemente utilizados para a fabricação de polióis, oferecendo uma alternativa mais ecológica e com menor impacto ambiental (MIRANDA, V. D., 2023). Esses polióis vegetais, ao serem incorporados na síntese do poliuretano, mantêm muitas das propriedades desejadas para aplicações industriais, ao mesmo tempo em que contribuem para a redução das emissões de carbono associadas à fabricação de polímeros. O uso de recursos renováveis também

possibilita o desenvolvimento de espumas e revestimentos de poliuretano que apresentam características biodegradáveis, facilitando a sua decomposição ao final de sua vida útil.

Além da vantagem ambiental, o uso de óleos vegetais como matérias-primas pode proporcionar benefícios adicionais em termos de desempenho dos materiais. A composição química dos óleos, rica em ácidos graxos insaturados, permite a modificação das propriedades das espumas de PU, como densidade e elasticidade. Isso é particularmente relevante para a produção de espumas flexíveis, que podem ser utilizadas em aplicações de maior conforto e absorção de impactos. Por outro lado, a utilização de polióis vegetais em espumas rígidas de PU melhora a resistência térmica e a estabilidade estrutural, tornando-as ideais para o isolamento térmico em construções sustentáveis. Assim, os avanços na síntese de poliuretanos a partir de fontes renováveis contribuem para uma abordagem mais sustentável na indústria de polímeros, sem comprometer a eficiência e a versatilidade dos materiais produzidos.

**Figura 2:** Espuma de palma (a), soja (b) e linhaça (c) produzidas (Adaptado de MIRANDA, V. D., 2023).



**Fonte:** (MIRANDA, V. D., 2023).

Essas espumas, além de reduzirem a dependência de recursos fósseis, apresentam propriedades específicas que variam conforme o óleo utilizado. Isso permite ajustes no desempenho mecânico e térmico dos materiais, tornando-os adequados para uma gama ainda maior de aplicações.

Portanto, os poliuretanos se destacam por sua versatilidade e potencial de personalização, sendo amplamente utilizados em diversas indústrias, desde a construção civil até a saúde. A incorporação de agentes antimicrobianos em sua estrutura amplia ainda mais

suas aplicações, permitindo a criação de superfícies seguras e protegidas contra a proliferação de microrganismos. Com o foco em soluções sustentáveis, a adaptação dos processos de síntese para incluir matérias-primas renováveis representa um avanço significativo na direção de uma indústria mais responsável e ecológica.

#### **2.4.2 POLIUREIA**

A poliureia é um polímero frequentemente usado na indústria da construção civil como impermeabilizante, devido sua elevada resistência química, resistência a ácidos e derivados do petróleo. Possui uma boa estabilidade térmica, elevado módulo de elasticidade e capacidade de alongamento, assim como, uma elevada resistência à abrasão e ao impacto.

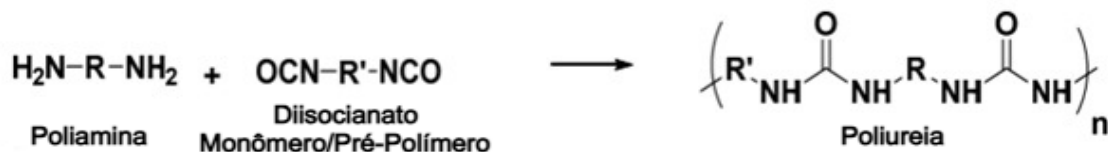
Detalhando quimicamente, uma poliureia pode ser obtida da reação entre um isocianato à base de MDI (difetilmetano disocianato) ou HDI (hexametileno disocianato), uma mistura de vários produtos orgânicos, sendo que a cadeia principal é constituída por polióis poliéteres com terminação amina. Estão também presentes na composição diaminas primárias, aromáticas ou alifáticas, além de extensores de cadeia e agentes de cura. Outros, como aditivos e pigmentos, podem ser incorporados, com o cuidado de sempre manter a proporção 1:1. A composição do componente amínico é fundamental para a obtenção de propriedades específicas das poliureias. (Tecnologia de materiais, 2013)

A poliureia é um polímero amplamente utilizado na construção civil, especialmente em aplicações que exigem alto desempenho como impermeabilizantes. Sua popularidade se deve à sua elevada resistência química, especialmente contra ácidos, álcalis e derivados de petróleo, além de sua durabilidade em ambientes agressivos. Isso faz da poliureia uma opção ideal para revestimentos protetores em estruturas como tanques de armazenamento, tubulações e pisos industriais, onde é essencial uma proteção de longa duração (Santana, S, J, et al., 2021). A poliureia também é conhecida por sua estabilidade térmica, suportando variações de temperatura sem perder suas propriedades mecânicas, o que é crucial em aplicações ao ar livre ou em ambientes com variações térmicas significativas.

Do ponto de vista químico, a poliureia é obtida pela reação entre um isocianato, geralmente MDI (difetilmetano diisocianato) ou HDI (hexametileno diisocianato), e aminas,

que podem ser primárias aromáticas ou alifáticas. A reação é rápida, formando uma rede tridimensional de ligações urea, o que confere ao material suas características de resistência e flexibilidade. A síntese pode ser representada de forma esquemática na Figura 2, que ilustra as etapas envolvidas na formação da estrutura de poliureia a partir de seus precursores.

*Figura 2. Esquema geral da síntese de poliureia.*



**Fonte:** Adaptado de Rusen, E. et al., 2024

A composição do componente amínico na formulação da poliureia é um fator crítico para definir suas propriedades finais, como a capacidade de alongamento e resistência à abrasão. A utilização de diaminas primárias e extensores de cadeia permite ajustar características como a dureza e a flexibilidade do material, tornando possível sua aplicação em superfícies de concreto, metais e até mesmo em áreas sujeitas a grandes impactos mecânicos (Santana, S, J, et al., 2021). Além disso, aditivos e pigmentos podem ser incorporados para conferir propriedades adicionais, como resistência aos raios UV e coloração, desde que se mantenha a proporção 1:1 entre isocianato e aminas, garantindo uma reação equilibrada e completa.

#### **2.4.2.1 ASPECTOS AMBIENTAIS**

A poliureia oferece vantagens ambientais, principalmente por sua durabilidade e pela formação de uma barreira protetora que pode reduzir a necessidade de manutenções frequentes, diminuindo assim a produção de resíduos e o uso de materiais adicionais ao longo do tempo. Quando aplicada corretamente, a camada de poliureia pode proteger superfícies contra a degradação por décadas, contribuindo para a sustentabilidade em projetos de longo prazo (Santana, S, J, et al., 2021). Contudo, a produção e aplicação da poliureia ainda enfrentam desafios significativos, especialmente no que diz respeito ao uso de isocianatos, que são compostos potencialmente tóxicos. Durante a aplicação, é necessário um controle rigoroso das

condições de trabalho, incluindo ventilação adequada e uso de equipamentos de proteção individual, para evitar riscos à saúde, como irritações respiratórias e problemas dermatológicos.

Apesar de suas vantagens, a poliureia é um material sintético e, como tal, apresenta baixa biodegradabilidade, o que implica em desafios ao seu descarte e reciclagem. No entanto, sua longa vida útil pode compensar essa limitação, uma vez que contribui para a redução da frequência de reparos e substituições em superfícies protegidas. Isso faz com que, apesar dos desafios ambientais, a poliureia permaneça uma escolha valiosa para aplicações onde a resistência extrema e a durabilidade são primordiais, especialmente em ambientes industriais e na infraestrutura urbana (Santana, S, J, et al., 2021).

#### **2.4.2.2 BENEFÍCIOS E DESVANTAGENS DA POLIUREIA**

Embora tradicionalmente derivada de produtos petrolíferos, a poliureia pode ser considerada um revestimento "verde" ao atender a vários dos 12 princípios da química verde estabelecidos por Anastas e Warner (1998), como prevenção de resíduos, eficiência energética e redução de substâncias perigosas (Primeaux II, 2018).

Um dos fatores que contribuem para a sustentabilidade da poliureia é a possibilidade de reciclagem e reutilização do material. Grigsby et al. (1993) demonstraram a viabilidade de produzir poliureias utilizando poliuretanos e poliureias reciclados, indicando que o material removido pode ser reaproveitado em novos processos. Além disso, a aplicação da poliureia não requer o uso de solventes ou compostos orgânicos voláteis (VOCs), reduzindo o impacto ambiental durante sua aplicação (Primeaux II, 2018; Davey, 2021).

Porém, esta também é uma grande desvantagem, pois apesar de poder ser reciclada, a poliureia, assim como o poliuretano, não pode ter seus componentes A e B separados, o que significa que uma vez formada, não poderá ser convertida em matéria prima novamente.

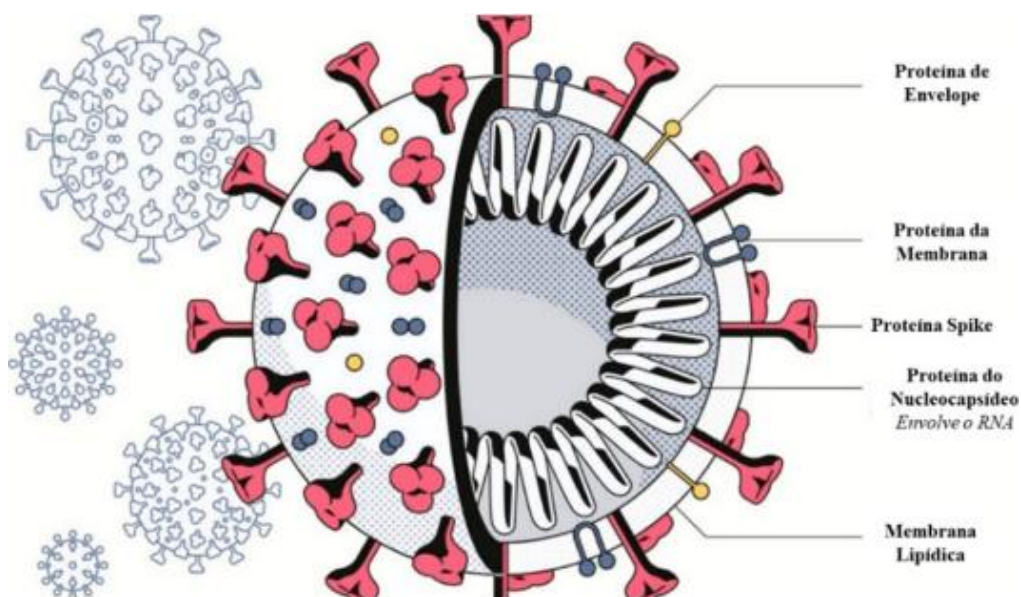
## **2.5 CONFIGURAÇÃO DO SARS-COV-2**

O vírus da Síndrome Respiratória Aguda Severa do Coronavírus 2 (SARS-CoV-2) do inglês *Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2*, provoca uma infecção aguda no trato

respiratório conhecida como COVID-19. Durante a pandemia, em 2020, os infectados relataram sintomas de forte pneumonia viral, incluindo febre, tosse e desconforto torácico e, em casos graves, dispneia e infiltração pulmonar bilateral. Além do mais, estudos comprovaram sua permanência em superfície inanimadas por horas ou até mesmo dias, a depender do material da superfície.

Os Coronavírus (CoVs), da família Coronaviridae, são vírus não segmentados, envelopados, de RNA de fita simples de sentido positivo que consistem em proteínas spike (proteína S), proteína de envelope (proteína E), glicoproteína de membrana (proteína M) e proteína de nucleocapsídeo (proteína N) em que o RNA viral é montado, como mostra a figura. (JUNIOR, C. F. M., 2022).

**Figura 3.** Representação esquemática da estrutura do SARS-CoV-2.



Fonte: Adaptado de Knowlton (2020)

A elevada transmissão do SARS-CoV-2 ocorre quando uma pessoa contaminada, mesmo que assintomática ou pré-sintomática, emite gotículas ao tossir ou espirrar, podendo transmitir o vírus. Se essas gotículas são aspiradas ou entram em contato com os olhos, nariz e boca de uma pessoa saudável, ela pode se contaminar. As gotículas podem também se depositar em superfícies e objetos no entorno da pessoa contaminada. Ao tocar essas superfícies e levar a mão ao nariz, olhos ou boca, uma pessoa saudável pode se contaminar.



A limpeza e desinfecção de objetos tocados por muitas pessoas em áreas de uso comum como corrimãos, botões de elevador, alças e guias de apoio em transportes públicos são ações importantes para conter a doença. A limpeza é caracterizada por processos que removem sujeira (exemplos: poeira, óleo) e não implica em desinfecção. A desinfecção é caracterizada por processos que eliminam micro-organismos patogênicos. (MONTORO, L. A. ET AL., 2020)

Como dito anteriormente, o SARS-CoV-2 encontra-se na classe dos vírus envelopados (contém lipídeos na estrutura de sua membrana), sendo a espécie mais suscetível à desinfecção química.

No entanto, produtos de limpeza são temporários e não têm uma ação duradora, havendo contaminação microbiana das superfícies pouco tempo depois da limpeza. (TIWARI, 2018). Além disso, a evaporação rápida dos desinfetantes impede sua entrada na célula microbiana, fazendo com que, o pouco contato entre desinfetante e microrganismo, seja insuficiente à lise (morte) celular. Dessa forma, observa-se a necessidade de um material alternativo capaz de reverter essa situação.

## **2.6 AGENTES ANTIMICROBIANOS**

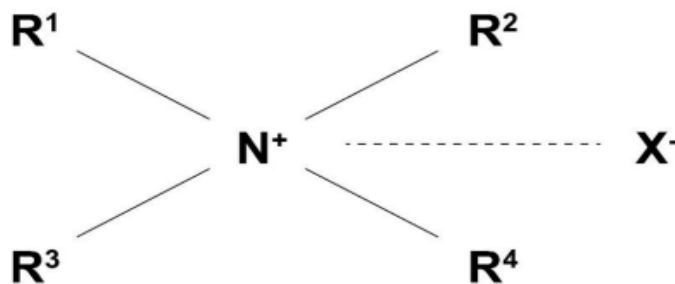
Será dito agora, sobre os agentes antimicrobianos, suas características, estruturas e principalmente o funcionamento destes agentes, criando então uma conexão entre os antimicrobianos e os revestimentos recém mencionados para os tópicos posteriores.

### **2.6.1 AMÔNIO QUATERNÁRIO**

Sais de amônio quaternários (QUATs), também conhecidos na literatura como QACs (acrônimo em inglês para quaternary ammonium compounds) são detergentes catiônicos e estão entre os desinfetantes/antissépticos mais comuns utilizados nos dias de hoje. São encontrados em produtos usados diariamente pela população como pastas de dente, xampus, cosméticos, medicamentos de uso tópico etc., bem como em produtos de limpeza domiciliar e para desinfecção hospitalar. (SANTOS et al., 2020).

A estrutura química geral dos QACs apresenta uma porção catiônica, na qual o nitrogênio está ligado covalentemente a quatro grupos alquila ou arila, mantendo sua carga positiva e a estabilidade da molécula independentemente do pH, além de uma porção aniônica carregada negativamente ( $X^-$ ), contida por cloro ou bromo (figura). Os QACs são ainda classificados com base na natureza dos grupos R, que podem incluir o número de átomos de nitrogênio, ramificação da cadeia de carbono e a presença de grupos aromáticos. Essas variações podem afetar a atividade antimicrobiana do QAC em termos de dose e ação contra diferentes grupos de microrganismos. GERBA, et al 2015)

*Figura 4. Estrutura geral dos compostos QACs.*



**Fonte:** Gerba, et al., 2015.

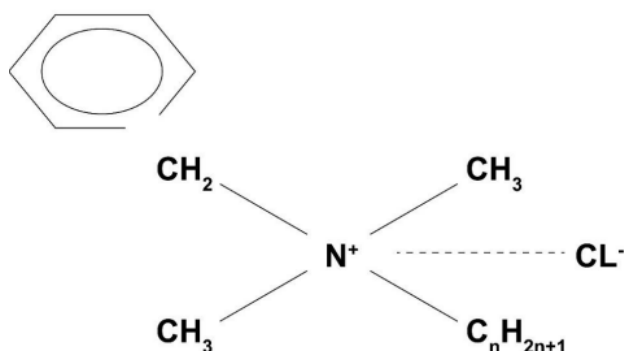
Muitos produtos germicidas contém uma mistura de sais de amônio quaternário, visando aumento geral de eficiência ou visando um grupo específico de microrganismos. A variedade de estruturas químicas sintetizadas levou à evolução dos sais de amônio quaternários, que são classificados agora em diversas gerações. Isto permitiu o aumento de eficiência, a redução de custos e a diminuição da toxicidade ao longo do último século. (SANTOS et al., 2020)

## 2.6.2 CLORETO BENZALCÔNICO

O cloreto benzalcônico é um composto surfactante catiônico, conhecido também como ADBAC ou BAC (cloreto de aquil-benzil-dimetilamônio ou cloreto de benzalcônio). Estruturalmente são constituídos por uma região hidrofóbica e outra hidrofílica e são facilmente solúveis em água, álcool e acetona (figura). (MUÑOZ, M, E, E., 2019).

O BAC é um sal usado como ingrediente ativo em diversos sanitizantes domésticos e hospitalares para a desinfecção de superfícies. Mesmo não sendo inofensivo, sua toxicidade só é percebida a longo prazo e quando utilizado em produtos de maior contato, como em medicamentos por exemplo. Além disso, para ser eficaz e seguro, deve ser usado em concentrações entre 0,05% e 0,2%.

*Figura 5. Estrutura Química do Cloreto de Benzalcônio.*



**Fonte:** GERBA et al., 2015

Assim como este, cloreto de cetilpiridínio (CPC), brometo de cetildimetilamônio (cetrimina), e cloreto de di-N-decil dimetilamônio também são exemplos de sais QUATs.

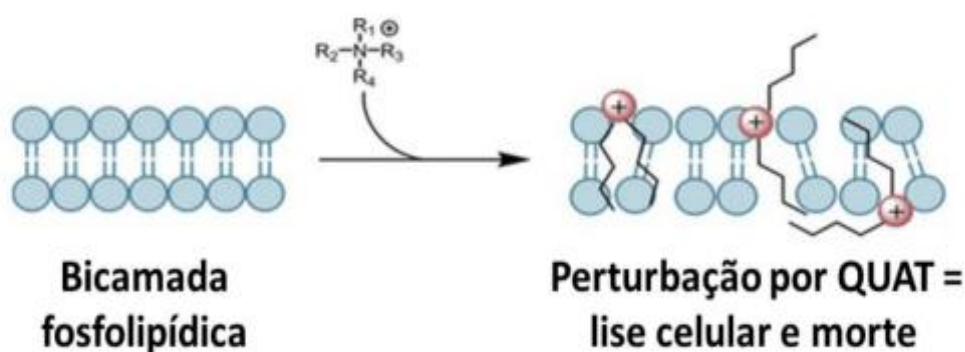
### 2.6.3 MECANISMO DE AÇÃO E ESTUDO DE CASO

Esses surfactantes catiônicos têm bastante afinidade para com a carga positiva. Além de atuarem em membranas citoplasmáticas de bactérias e membranas plasmáticas de fungos, a atividade hidrofóbica dos QACs também os torna eficazes contra vírus que contém lipídeos na estrutura da membrana, como o SARS-CoV-2. Eles também interagem com alvos intracelulares e podem se ligar a ácidos nucleicos. São também eficazes contra vírus e esporos não lipídicos, dependendo da concentração do produto. (SANTOS et al., 2020)

Os danos causados na membrana celular ocorrem nos seguintes eventos: (i) absorção e penetração dos QACs na parede celular; (ii) reação com a membrana citoplasmática (lipídeos

ou proteínas), seguida da desorganização da membrana; (iii) extravasamento do conteúdo de material intracelular de menor peso molecular devido ao rompimento da membrana; (iv) desnaturação de proteínas, ácidos nucleicos e enzimas; e (v) lise da parede celular ocasionada por enzimas autolíticas. (GERBA et al., 2015).

**Figura 6.** Modo de ação dos QUATs contra as membranas fosfolipídicas de bactérias e vírus. As esferas vermelhas representam átomos de nitrogênio positivamente carregados. (Extraído e adaptado)



**Fonte:** (SANTOS et al., 2020)

Xiling et al. (2021) investigaram a atividade antivirucida dos sais brometo de di-N-decildimetilamônio e cloreto de di-N-decildimetilamônio para inativação do SARS-CoV-2, por meio de testes quantitativos de suspensão. Os resultados obtidos demonstraram que, em uma diluição de 600 vezes uma concentração de 17% para ambos os sais desinfetantes, foi necessário apenas 0,5 minutos para a inativação do vírus com eficiência. Dessa forma, verifica-se que tanto o brometo de di-N-decildimetilamônio e o cloreto de di-N-decildimetilamônio, apresentam alta eficiência com baixa eficácia de dose e tempos de reação curtos, reivindicando um papel mais significativo dos QUATs na luta global contra a COVID-19. (FUMAGALLI ET AL. 2023).

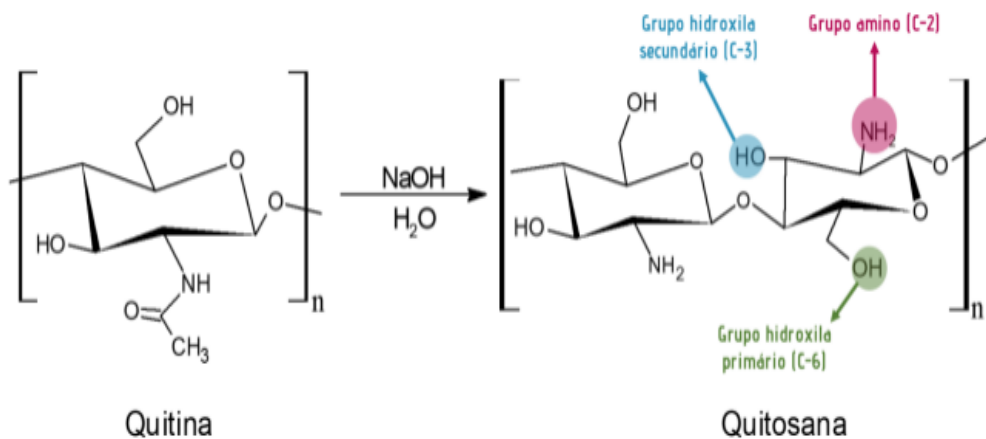
Outrossim, Ijaz et al. (2021) e Fumagalli et al. (2023), avaliaram a eficiência dos sais cloreto de benzalcônico (BAK) e brometo de p-bromodomifeno (BRO), respectivamente, na inativação do SARS-CoV-2. O BAK a 0,1% inativou o vírus em 2 minutos no teste do portador,

enquanto o BRO a 0,02% pôde inibir completamente a replicação do vírus em apenas 30 segundos.

#### 2.6.4 QUITOSANA

A quitosana é um polissacarídeo policatiônico ( $pK_a = 6,2-6,8$ ) de cadeias lineares encontrado na natureza atuando em funções estruturais de membranas celulares de alguns fungos e leveduras. Sua obtenção pode acontecer na natureza, através de enzimas específicas como a quitinase ou através da ação de microrganismos, e industrialmente é obtida a partir da desacetilação alcalina, em temperatura elevada, da quitina (figura). A quitina é um polissacarídeo que também tem função estrutural e é encontrado como principal constituinte do exoesqueleto de invertebrados, tais como crustáceos, moluscos, anelídeos e celenterados, podendo ainda estar presente em insetos e na composição da parede celular de fungos e leveduras. Ambas são polímeros atóxicos, biodegradáveis, biocompatíveis e produzidos por fontes naturais renováveis. Embora a quitina e a quitosana sejam constituídas por unidades 2-amino-2-desoxi-D-glucopirranose (GlcN) e 2-acetamido-2-desoxi-D-glucopirranose (GlcNAc), unidas por ligações glicosídicas do tipo  $\beta$  (1 $\rightarrow$ 4), na quitosana há a predominância de grupos GlcN, enquanto que na quitina os grupos GlcNAc prevalecem. (PAVINATTO, A. et al., 2022).

*Figura 7. Reação de N-desacetilação da quitina em condições alcalina.*



Fonte: Junior, C. (2022)

A fonte de matéria-prima, bem como os processos empregados na obtenção da quitosana, exercem forte influência nas características estruturais que regem as propriedades físico-químicas e biológicas desse polímero, a saber, massa molar média (MM), índice de polidispersão (PDI), grau médio de acetilação (GA), o qual é correspondente ao número médio de unidades GlcNAc na cadeia polimérica, e parâmetro de acetilação, o qual indica a sequência de distribuição dos grupos GlcNAc e GlcN nas cadeias de quitosana. Ademais, existem diversas “quitosanas”, a depender da fonte de obtenção e do processo de extração, gerando-a com diferentes características estruturais. De maneira geral, quanto menor o GA, maior é a atividade das quitosanas frente aos micro-organismos. Já com relação à MM, a atividade das quitosanas depende muito mais da espécie do micro-organismo (sua composição/estrutura), sendo que cadeias poliméricas maiores parecem inibir as células através do envolvimento das mesmas, enquanto cadeias poliméricas menores podem penetrar o interior das células. (PAVINATTO., 2023).

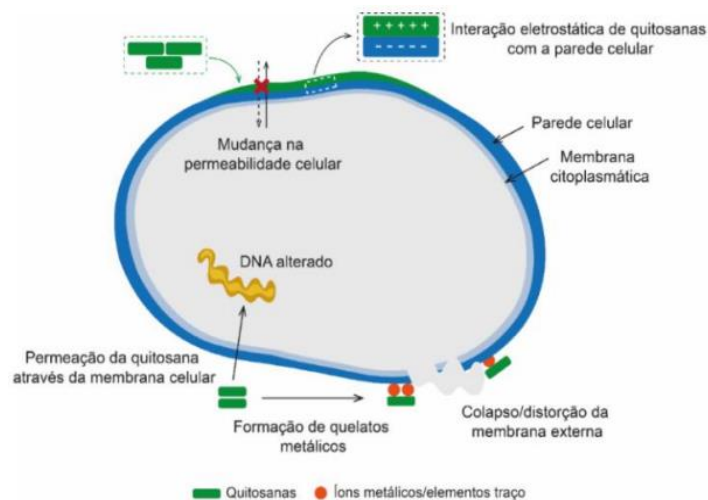
Devido à sua alta densidade de cargas positivas em solução ácida, a quitosana possui uma estrutura química que favorece uma forte interação eletrostática entre os grupamentos aminos, permitindo que atue como um veículo de transporte de substâncias ao se adsorver em superfícies com carga negativa. Por esta razão, a quitosana apresenta excelentes propriedades antioxidante e antimicrobiana, eficaz tanto contra bactérias Gram-positivas quanto Gram-negativas.

No tocante a ação antimicrobiana da quitosana, alguns estudos explicam esse efeito, segundo Paolini N. A. (2023):

- Interação eletrostática dos grupos positivos ( $-NH_3^+$ ) da quitosana com as cargas negativas da parede celular do microrganismo. Essa conexão pode causar um duplo efeito: alterar a permeabilidade da membrana celular, resultando em desequilíbrios osmóticos internos, o que inibe o crescimento dos microrganismos; e promovendo a hidrólise da camada de peptidoglicanos, levando à perda de íons ou compostos intracelulares de baixa massa molecular, como proteínas, ácidos nucleicos e glicose;

- Quelação de nutrientes (íon metálicos) essenciais para o crescimento microbiano. A quelação é uma forma de a quitosana exercer sua atividade antimicrobiana, ao privar os microrganismos de íons metálicos necessários para suas funções vitais. Assente nisso, alguns estudos relacionam essa atuação com interação com cargas positivas (-NH<sub>3</sub><sup>+</sup>) da molécula, obtida pela solubilização em meios ácidos. Entretanto, outros estudos dissertam sobre esse efeito dando enfoque aos grupamentos (-NH<sub>2</sub>) responsáveis por essa interação com cátions metálicos, por isso comenta-se sobre essa atuação ser mais eficiente em pH mais alto, uma vez que os grupos amino estão desprotonados e o par de elétrons do nitrogênio está disponível para doação de elétrons aos íons metálicos;
- formação de um filme polimérico espesso sobre a superfície do microrganismo, dificultando em trocas gasosas e de nutrientes com o meio. Microrganismos, como bactérias, precisam realizar trocas gasosas e de nutrientes com o meio externo para sobreviver e se reproduzir. Ao bloquear essas trocas, o filme polimérico impede o microrganismo de obter os recursos necessários para suas funções vitais, o que pode levar à sua inibição ou lise;
- Interação entre a quitosana com o DNA do microrganismo, afetando a síntese de proteínas devido à inibição do RNA mensageiro.

**Figura 8.** Representação dos principais mecanismos de ação das quitosanas frente a microrganismos.



Fonte: MACEDO et al., 2022

Em um estudo realizado por Younes et al., em 2014, quinze amostras de quitosanas homogêneas com diferentes graus de acetilação (GA) e pesos moleculares (MM), foram utilizadas para investigar a eficácia antimicrobiana contra quatro bactérias Gram-negativas (*Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Klebsiella pneumoniae* e *Salmonella typhi*) e quatro bactérias Gram-positivas (*Staphylococcus aureus*, *Bacillus cereus*, *Enterococcus faecalis* e *Micrococcus luteus*). Os autores observaram maior eficiência no efeito inibitório para ambos os grupos com a diminuição do GA e, de modo geral, as amostras apresentaram maior efeito bactericida contra bactérias G- com a diminuição do MM.

Semelhantemente, Cele et al., em 2023, avaliaram a capacidade de derivados catiônicos da quitosana, a quitosana enxertada com ácido hidroxipropanóico (HPA-CS) e o cloreto de quitosana N-(2-hidroxipropil)-3-trimetilamônio (HTCC), quanto à capacidade antiviral contra o vírus da imunodeficiência humana (HIV) e o coronavírus SARS-Cov-2 em máscaras revestidas. Ambos mostraram um potencial significativo de ruptura da membrana, com cerca de 80% de hemólise<sup>1</sup> a 1,0 mg/mL, em contraste com a quitosana não modificada, que não apresentou essa atividade. Nos ensaios antivirais, o HTCC demonstrou maior eficácia contra o HIV, com um CI50<sup>2</sup> de 0,225 mg/mL, em comparação com o HPA-CS (CI50 de 4,109 mg/mL).

As máscaras revestidas com HTCC mostraram quase 100% de inibição do SARS-CoV-2, em comparação com menos de 60% das máscaras não revestidas. Os autores sugerem que o HTCC interage com a proteína spike do coronavírus, bloqueando a interação com os receptores da célula hospedeira.

## 2.6.5 NANOTECNOLOGIA E NANOPARTÍCULAS

A nanotecnologia é o controle e a manipulação de átomos e moléculas em nano-escala, unidade que equivale a  $1 \times 10^9$  metros, ou um milionésimo de milímetro. (LEOPOLDO, C. J., & DEL VECHIO, G. H., 2020; BASTOS, R. M. P., 2006). Por seu tamanho, nanopartículas

---

<sup>1</sup> Processo de destruição das células vermelhas do sangue, resultando na liberação de hemoglobina no plasma sanguíneo.

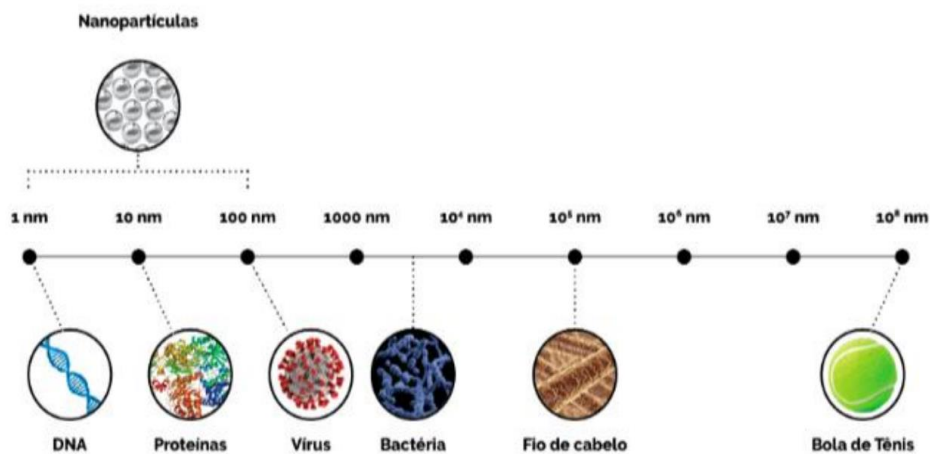
<sup>2</sup> Inhibitory Concentration 50%



atuam no desenvolvimento de materiais e componentes para diversas áreas como: medicina, eletrônica, biologia, ciência da computação e engenharia dos materiais. Um dos princípios básicos da nanotecnologia é a construção de estruturas e materiais a partir dos átomos, com o objetivo de elaborar estruturas estáveis e melhores do que se estivessem em seu tamanho convencional, devido aos elementos se comportarem de maneira diferente em nano-escala (O QUE..., s.d.).

O avanço no desenvolvimento de materiais nanoestruturados vem recebendo bastante destaque no meio científico e se tornando de fundamental importância devido à interdisciplinaridade entre vários campos da ciência, e por permitir a obtenção de novos materiais com melhores propriedades físicas e químicas. (SCHIAVON, ET AL. 2014).

*Figura 9. Representação da escala nanométrica.*



Fonte: TNSNANO (2020)

### 2.6.5.1 ÓXIDOS METÁLICOS

Os óxidos metálicos são compostos químicos formados pela ligação entre um metal e o oxigênio. Eles apresentam diversas propriedades físicas e químicas, como condutividade elétrica, capacidade de reagir com ácidos, antibactericida, entre outras. (maestrovirtuale).

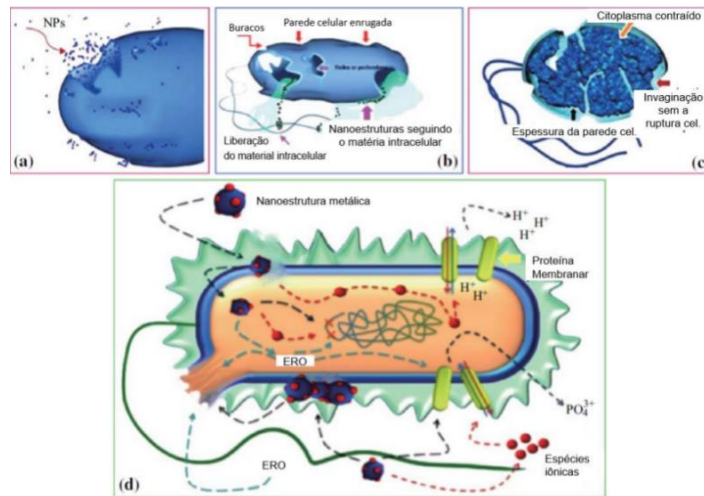
No que concerne aos óxidos metálicos com propriedades antibacterianas para aplicações diversas, o óxido de prata (Ag<sub>2</sub>O), dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>), óxido de cobre (CuO), óxido de

zinco (ZnO), óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO) mostraram êxito nesse quesito. (ADIBKIA, K. ET AL., 2014).

Quando o óxido metálico é reduzido à escala nanométrica, sua capacidade antimicrobiana é aumentada exponencialmente. Várias teorias têm sido relatadas sobre o efeito bactericida de óxidos metálicos nanoestruturados, que são descritas abaixo, por Vega-Jiménez et al., (2018):

- Danos à membrana da parede celular devido à interação e acúmulo eletrostático. Os grupos eletronegativos de polissacarídeos na membrana bacteriana são locais de atração de cátions metálicos. A diferença de carga entre as membranas bacterianas e o óxido metálico NPS leva à atração eletrostática e, portanto, se acumula na superfície da bactéria, alterando a estrutura e a permeabilidade da membrana celular;
- Estresse oxidativo, formação de espécies reativas de oxigênio (EROs): O estresse oxidativo é uma condição em que o oxigênio molecular ( $O_2$ ), vindo dos óxidos metálicos em forma de nanopartículas ou já presentes no ambiente celular, reage com os elétrons e outras estruturas presente na célula microbiótica, produzindo os EROs, como peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ), superóxido ( $O_2^-$ ) e radicais de hidroxila ( $OH^\cdot$ ), a níveis que excedem a capacidade das defesas antioxidantes da célula bacteriana, levando a danos em proteínas, lipídios e ácidos nucleicos;
- Perda da homeostase devido a liberação de íons metálicos: A Homeostase refere-se ao equilíbrio interno que as células mantêm para funcionar corretamente, isso inclui a regulação de concentrações de íons, pH, temperatura etc. Quando as bactérias têm um excesso de metais ou íons metálicos, a capacidade da célula de manter seu equilíbrio interno é comprometida, pois os íons metálicos se ligam ao DNA e alteram a natureza helicoidal por reticulação entre e dentro das fitas de DNA, impedir que o este seja corretamente replicado ou transcrito, bloqueando a divisão celular e a síntese de proteínas.

**Figura 10.** Interação entre a nanopartícula e célula bacteriana.



**Fonte:** Adaptado de Sirelkhatim (2015)

Com base nisso, é possível encontrar na literatura, majoritariamente, trabalhos envolvendo o uso de nanopartículas de óxido de prata, zinco e cobre, que, devido ao tamanho reduzido de suas partículas e uma conseqüente maior área de superfície, maior também a eficiência dos óxidos metálicos nanoestruturados.

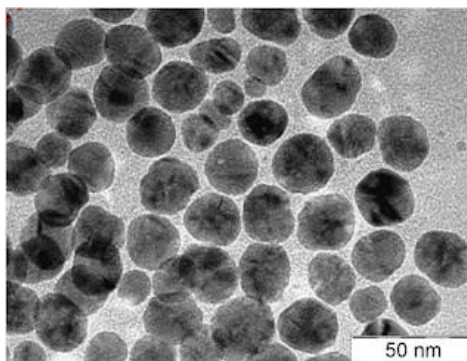
#### 2.6.5.2 NANOPARTÍCULAS DE PRATA

A prata é um elemento químico de símbolo Ag, encontrado no estado sólido à temperatura ambiente. É considerada um metal maleável, dúctil, brilhante, utilizada em processos industriais como a fotografia, desinfecção de frutas, de material ortodôntico e outras diversas aplicações (SOUZA et al., 2013).

As propriedades antimicrobianas da prata são conhecidas desde a antiguidade, onde a água e outros líquidos eram armazenados em recipientes revestidos de prata, isso tornava a água potável por um maior período. Na primeira guerra mundial componentes de prata eram utilizados para evitar infecções entre os feridos. Em 1884, tornou-se uma prática comum, introduzida inicialmente pelo obstetra alemão F. Crede, administrar gotas de nitrato de prata aquoso nos olhos dos recém-nascidos para evitar a transmissão de oftalmia gonorréica neonatal das mães infectadas para seus filhos durante o parto (Silvestry-Rodriguez, 2007). Na forma de nanopartículas, essas propriedades são intensificadas devido ao aumento da superfície de contato (GARCIA et al., 2011).

As nanopartículas de prata, dentre as nanopartículas metálicas, são as mais conhecidas, e existe grande interesse em sua utilização, devido aplicações em diferentes áreas, como na medicina humana e veterinária, farmacologia, odontologia, indústria alimentícia, entre outras (Petica et al. 2008, Pereira et al. 2013) Elas possuem ação bactericida já conhecida, causando alterações e até mesmo rompendo a membrana ou parede celular, aumentando o número de espécies reativas de oxigênio, promovendo danos as células.

**Figura 11.** *Nanopartículas de prata escaneadas por MEV.*



**Fonte:** <https://nanohoje.blogspot.com/2012/07/nanotecnologia-verde-para.html>

A prata mostra que sua toxicidade para mamíferos não é comum, além de não existir evidências de que esse metal apresente atividade cancerígena. Vários metais pesados podem ser biocidas ou antissépticos, inclusive a prata, a capacidade de quantidades muito pequenas de esses metais pesados exercerem atividade antimicrobiana é referido como ação oligodinâmica, esse efeito é produzido pela ação dos íons metálicos sobre os micróbios. Entre os metais a prata tem sido o que melhor apresenta propriedades antimicrobianas e menor toxicidade para os mamíferos (Tortora, 2005).

Marcone et al., (2015), sintetizaram nanopartículas de prata, utilizando  $\text{AgNO}_3$  como agente precursor e  $\text{NaBH}_4$  como redutor, e avaliaram sua atividade bacteriana para soluções contendo *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* e *Staphylococcus epidermidis* utilizando testes de difusão em disco. As nanopratas obtidas apresentaram formato esférico e estável (por 120 dias), e foram eficazes para todos os microrganismos testados.

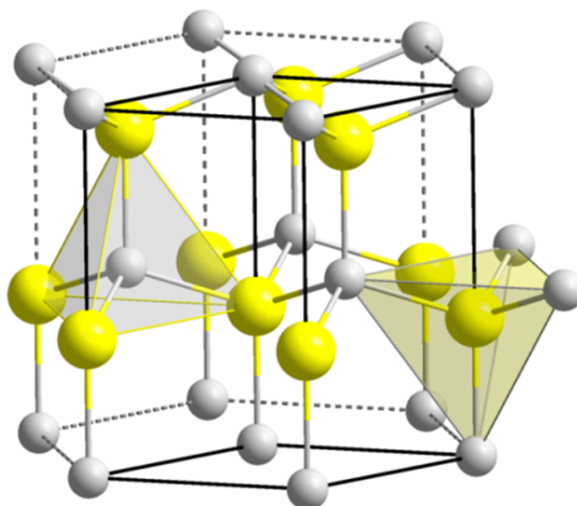
Silva, M. C., (2021), avaliou a capacidade virucida de nanopartículas de prata de fonte comercial, com tamanho de 25 nm, realizada para a aplicação via polimerização in situ. Os

resultados obtidos demonstraram inativação de 2 Logs = 99% para cepa do SARS-CoV-2, mostrando o potencial das nanopartículas de prata.

### 2.6.5.3 NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINCO

O óxido de zinco é um semicondutor intrínseco do tipo n, encontrado naturalmente no mineral chamado zincita e está na classe dos óxidos condutores transparentes (TCO), sendo altamente transparente à luz visível e eletricamente condutor. (JANOTTI, 2009). É um pó fino, amorfo, de coloração branca e com densidade igual a 5,6 g cm<sup>-3</sup>, é uma molécula covalente, com hibridização sp<sup>3</sup> e apresenta caráter anfótero. (DIAS, 2006). Outro fator importante é a fácil cristalização do ZnO, sendo que em condições normais de temperatura e pressão, obtêm-se a estrutura cristalina de maior estabilidade termodinâmica, do tipo hexagonal compacta denominada de Wurtzita. Consequentemente, esta é a estrutura mais comum apresentada pelo ZnO (MORKOÇ; ÖZGÜR, 2009).

*Figura 12. Representação da estrutura cristalina de forma hexagonal do ZnO como Wurtzita. Esferas amareladas representam os átomos de zinco e as esferas brancas os átomos de oxigênio.*



*Fonte: Júnior, Luiz & de Carvalho, H. (2014).*

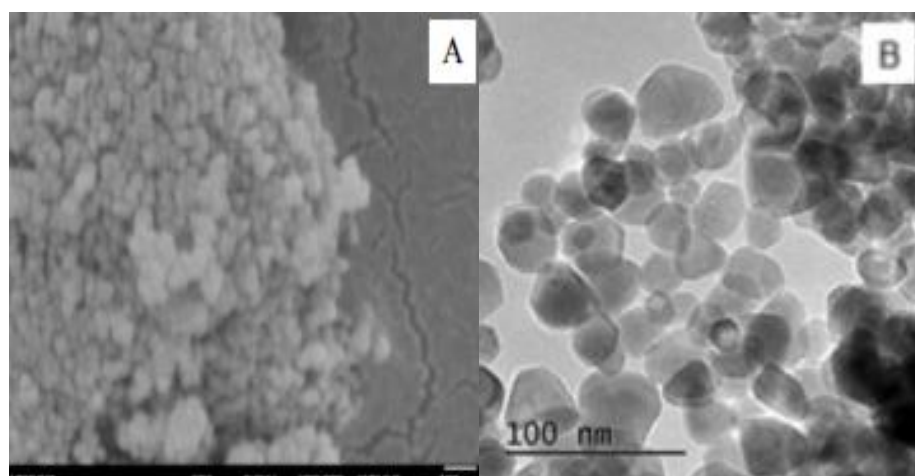
Este óxido tem sido um importante material industrial durante muito de tempo e atualmente vem sendo objeto de interesse considerável, por apresentar uma combinação de propriedades, como atoxicidade contra células humanas (o que reforça seu uso como agente antimicrobiano),

alta densidade, baixo custo, caráter anfótero, solubilidade em ácidos e bases, e em condições normais de pressão, possui ponto de fusão próximo a 1800°C, revelando assim sua estabilidade termoquímica. (SILVA, T. E. M., 2021).

Quando o ZnO é reduzido em partículas nanométricas, suas propriedades são exponencialmente otimizadas. Há vários métodos para obtenção dessas nanopartículas, como através da hidrotérmica (meio aquoso), solvotérmica (solvente), sol-gel, co-precipitação, deposição química e física, poliol ou até mesmo por radiação micro-ondas.

No que concerne ao método poliol, Nogueira et al. (2017) sintetizaram NPs-ZnO e avaliaram sua atividade antibacteriana contra a bactéria Gram negativa *Escherichia coli*. De maneira resumida, os autores utilizaram acetato de zinco dihidratado (CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>Zn·2H<sub>2</sub>O (99,995%) como sal precursor, monoetilenoglicol (Quimidrol) como veículo do meio reacional e água deionizada como iniciador das reações de hidratação e condensação responsáveis pela nucleação das nanopartículas. Os resultados obtidos demonstraram que o método do poliol foi capaz de produzir NPs-ZnO com elevado grau de pureza e diâmetro médio em torno de 20 nm como mostra a figura 2 e 3. Para além disso, os ensaios microbiológicos comprovaram que as nanopartículas de óxido de zinco produzidas apresentaram excelente atividade antibacteriana contra a bactéria *Escherichia coli* quando aplicadas em concentrações superiores a 50 mg. L<sup>-1</sup>.

**Figura 13.** *Imagens obtidas por MEV-FEG (A) e por MET (B) das nanopartículas de óxido de zinco produzidas pelo método poliol*

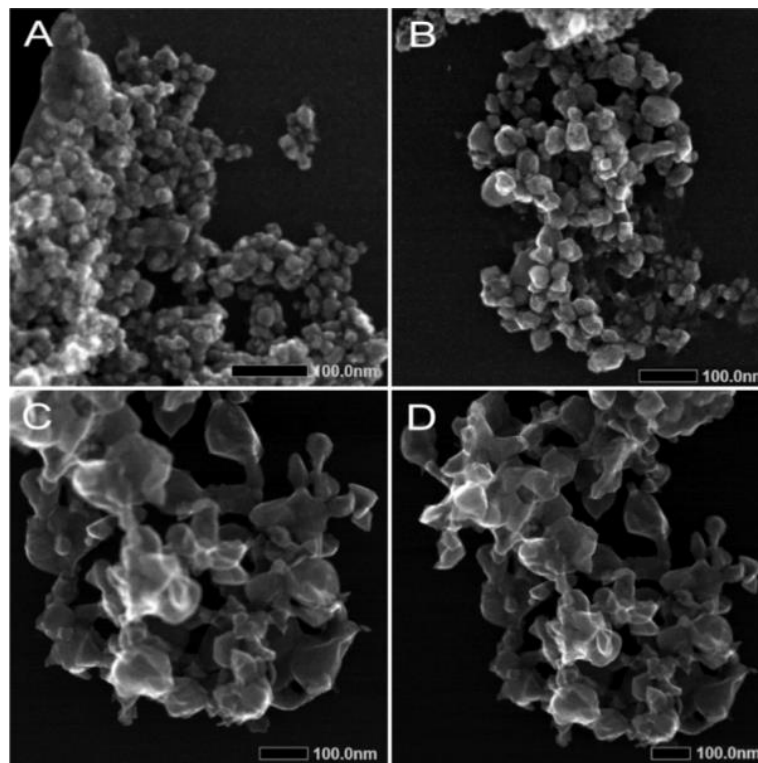


**Fonte:** Nogueira et al., (2017)

Katloukal et al., (2023), avaliaram o potencial de inativação in vitro de dois diferentes tamanhos de NPs-ZnO para com cepas do SARS-CoV-2 e suas variantes, através de um método “verde”. Para a síntese deste, foram utilizados sais (nitratos, cloratos e sulfatos) como material de partida e soro de leite como agente quelante, ao invés de reagentes analíticos convencionais. As nanoestruturas obtidas diferiram na distribuição de tamanho, com ZnO-NP-45 consistindo em partículas que variam de 30 nm a 60 nm e ZnO-NP-76 de 60 nm a 92 nm (Figura 4).

Embora ambos sejam ativos contra o vírus e suas variantes em concentrações de 10 a 20 mg / mL, o ZnO-NP-45 foi considerado mais ativo do que o ZnO-NP-76, resultando na inativação das variantes Delta e Omicron SARS-CoV-2 por um fator de mais de  $10^6$ . Esse efeito se deve à sua maior superfície reativa total.

**Figura 14.** *Imagens de Microscopia Eletrônica de Transmissão de Varredura (STEM) de ZnO-NP-45 (A, B) e ZnO-NP-76 (C, D)*



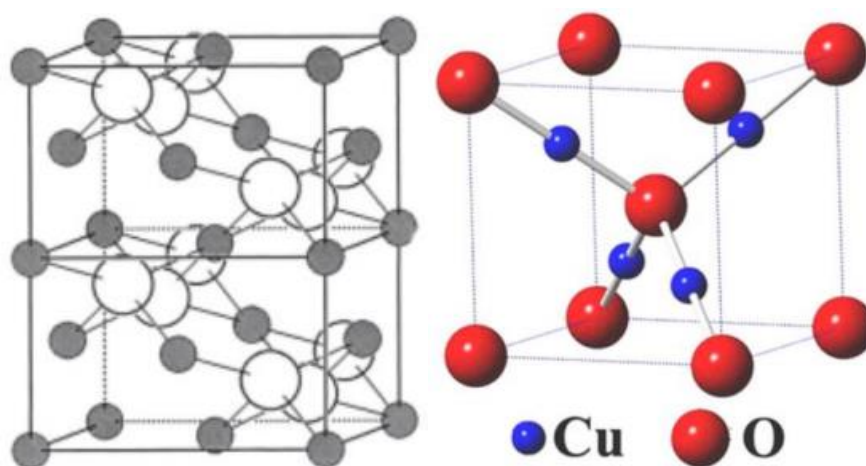
**Fonte:** Katloukal et al., (2023).

#### 2.6.5.4 NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE COBRE I E II

O cobre é classificado como elemento de transição com estados de oxidação típicos de +1 e +2, formando dois óxidos binários, óxido de cobre (I) ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) e óxido de cobre (II) ( $\text{CuO}$ ). O óxido de cobre na forma de  $\text{CuO}$  (óxido cúprico) é composto semiconductor de estrutura monoclinica, sendo o mais simples composto de cobre; é quimicamente estável e abundante. Considerado um dos materiais mais baratos dentre os óxidos metálicos, o óxido de cobre apresenta propriedades químicas e físicas promissoras, tendo aplicações no campo da catálise, sensor de gases, conversão de energia solar, além de atividade antimicrobiana, principalmente quando na forma de nanopartícula, devido a sua grande área de superfície (REN et al., 2009; ANANTH, 2014; PHIWDANG, 2013).

O modo de como o  $\text{CuO}$  se apresenta estruturalmente na natureza é na forma de mineral tenorita, sendo esta a forma mais estável do composto. Essa disposição estrutural se dá com átomos de cobre (II) rodeados por quatro átomos de oxigênio com geometria quadrado planar, como se observa na Figura 5. (WOLD; DWIGHT, 1993).

**Figura 15.** *Imagens de Microscopia Eletrônica de Transmissão de Varredura (STEM) de ZnO-NP-45 (A, B) e ZnO-NP-76 (C,D)*



**Fonte:** Wold e Dwight (1993); Gao et al., (2015)



Este óxido é historicamente utilizado como pigmento para a coloração de vidros, cerâmicas, porcelanas e cristais artificiais; em baterias e eletrodos; em tintas anti-incrustação utilizadas no casco de embarcações; fabricação de rayons (fibras têxteis); e remoção de enxofre presente em óleos (PATNAIK, 2003) (SCHLAGER; WEISBLATT; NEWTON, 2006). Além disso, foi usado também para prevenir a propagação de diferentes doenças desde o antigo Egito, passando pelo Império Romano e até mesmo na Segunda Guerra Mundial (Prado et al., 2012; Vincent et al., 2016)

A toxicidade apresentada pelas nanopartículas de óxido de cobre faz delas eficazes agentes antibacterianos. Dessa maneira, os mecanismos de interação entre a célula bacteriana e o Cu<sub>2</sub>O ou CuO estão normalmente relacionados à liberação dos íons Cu<sup>+1</sup> ou Cu<sup>+2</sup>, que acontece através da dissolução dos metais da superfície das nanopartículas. Estes íons liberados agem danificando a membrana celular bacteriana, por meio de interações eletrostáticas e alterações químicas.

Silva, C. V. F., (2022) sintetizou NPs CuO e NPs Cu<sub>2</sub>O, se baseando na metodologia Pechini de forma adaptada e investigou a influência destas nanoestruturas no crescimento microbiano das bactérias *Staphylococcus epidermidis*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Salmonella* spp. e *Escherichia coli*, através do método de difusão em ágar. O processo Pechini (BESSO, 1965) consiste na formação de espécies de compostos orgânicos ligados a íons metálicos, denominadas quelatos. A formação destes quelatos ocorre a partir da interação entre cátions metálicos, dissolvidos com sais em solução aquosa, e ácido carboxílico, normalmente sendo o ácido cítrico; porém, para este estudo, as proporções foram alteradas, de modo a obter óxidos puros ao invés de dopados, como abordado na metodologia original, sendo 1:2:3 em relação ao etilenoglicol: ácido cítrico: íon metálico precursor dos óxidos, respectivamente. Ambas as NPs foram capazes de inibir o crescimento de todas as quatro bactérias utilizadas no estudo. Todavia, as NPs Cu<sub>2</sub>O apresentaram maior diâmetro nos halos de inibição, devido a, segundo o autor, o fato do composto apresentar maior concentração de íons metálicos em sua estrutura, podendo conferir características mais tóxicas às nanopartículas em relação aos microrganismos.

Ademais, pesquisadores da Universidade de Tóquio conduziram um estudo sobre o potencial viral do Cu<sub>2</sub>O como nanofotocatalizador, cuja partículas podem ser excitadas pela luz fluorescente, o que permite, através da fotocatalise, que os óxidos de cobre possam ser

renovados por uma reação de oxirredução com o  $\text{TiO}_2$  (também presente no estudo), e portanto, a atividade antiviral se mantenha constante e por um tempo prolongado. Os resultados obtidos foram promissores: o uso dos nanofotocatalisadores inibiu a atividade viral não apenas do coronavírus original, mas também da variante alfa, do vírus da gripe Influenza A e do *Calicivirus* felino, que causa uma infecção respiratória em felinos. O estudo também quantificou a interação da proteína *spike* (presente no coronavírus) com os receptores celulares e, quando submetidos à uma solução com as nanopartículas, ela foi significativamente reduzida. (GREGGIO, G., 2023).

## **2.7 POSSÍVEIS COMBINAÇÕES REVESTIMENTO/AGENTE**

Nos últimos anos, a demanda por revestimentos poliméricos com propriedades antimicrobianas tem crescido significativamente (Tiwari, 2018; Silva, 2021). Esses revestimentos são essenciais para proteger superfícies contra a proliferação de microrganismos, sendo amplamente utilizados nos setores de saúde, alimentação, indústria e ambientes residenciais (Tortora et al., 2005; WHO, 2020). A inovação nesse campo aprimora as propriedades físicas e químicas dos materiais, oferecendo soluções sustentáveis e eficazes no combate a patógenos (Prado et al., 2012; Sportelli et al., 2022).

Dentre os assuntos destacados abaixo, se encontra a incorporação de nanopartículas metálicas, como óxido de zinco e prata, em diferentes polímeros base, como a Poliureia e o Poliuretano Expandido, mencionados anteriormente (Katloukal et al., 2023). Essas nanopartículas possuem propriedades virucidas comprovadas e, quando combinadas com um polímero, podem resultar em revestimentos com eficácia antiviral ainda maior (Silva, 2021; Wolfgruber et al., 2023). Se o material utilizado apresenta uma superfície de contato ampliada, a eficiência virucida pode ser potencializada (Dias & Júnior, 2006; Janotti & Van de Walle, 2009), assim, por meio de diferentes combinações e testes, é possível desenvolver revestimentos antimicrobianos e antivirais com desempenho superior aos encontrados atualmente (Vega-Jiménez et al., 2018; Younes et al., 2014).

## **2.8 EFEITO DAS NANOPARTÍCULAS EM REVESTIMENTOS**

Este tópico aborda a incorporação de nanopartículas em revestimentos de poliuretano e poliureia, destacando as interações entre esses materiais e os benefícios resultantes dessa combinação. A união dessas tecnologias tem o potencial de aprimorar significativamente as propriedades mecânicas, antimicrobianas e antivirais dos revestimentos, ampliando suas aplicações em diversos setores industriais e comerciais. Embora nem todas as nanopartículas disponíveis sejam mencionadas, foi realizado um estudo focado em resultados gerais esperados, com variações em eficácia, custo e métodos de obtenção e fabricação.

O poliuretano expandido é amplamente utilizado devido à sua resistência mecânica, isolamento térmico e leveza, sendo essencial em setores como construção civil, indústria automotiva e embalagens. A incorporação de nanopartículas metálicas, como óxidos de zinco (ZnO) e cobre (CuO), tem mostrado potencial para aprimorar suas propriedades antimicrobianas e mecânicas, tornando o material ainda mais versátil e resistente (Santana et al., 2021; Alkarri et al., 2024).

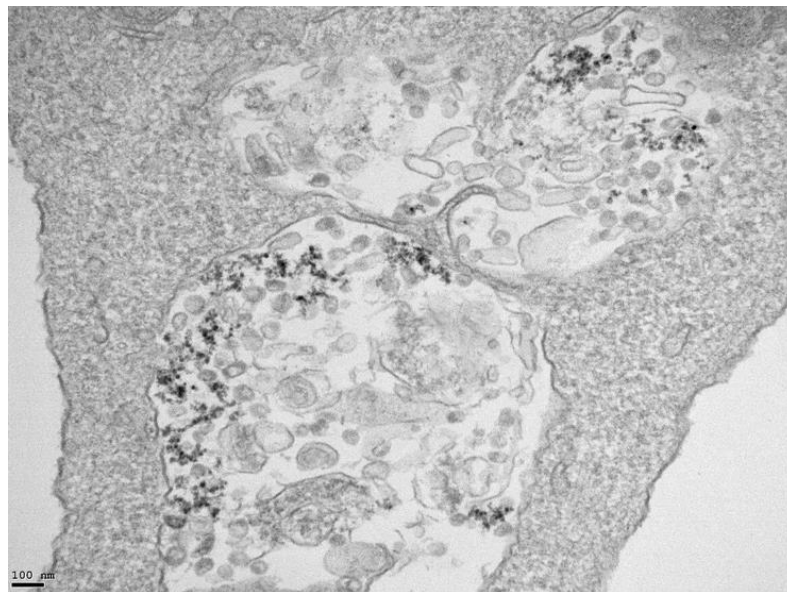
A poliureia, por sua vez, é conhecida por sua excelente resistência mecânica, flexibilidade e durabilidade. O desenvolvimento de revestimentos de poliureia com nanopartículas metálicas emergiu como uma abordagem promissora para criar superfícies antimicrobianas duradouras e eficazes. Essas nanopartículas, especialmente óxidos metálicos como ZnO e CuO, têm sido amplamente estudadas por sua capacidade de inibir o crescimento microbiano, tornando o material ideal para ambientes onde a prevenção de contaminação é crucial (Davey, 2021; Katloulak et al., 2023).

### **2.8.1 BENEFÍCIOS DA INCORPORAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS**

A integração de nanopartículas metálicas aos revestimentos de poliuretano e poliureia oferece múltiplas vantagens, especialmente no combate a microrganismos e no aumento da durabilidade dos materiais. As nanopartículas de óxidos metálicos são conhecidas por suas propriedades antimicrobianas eficazes contra bactérias, fungos e certos vírus. Elas atuam diretamente na membrana celular dos microrganismos, promovendo sua destruição e impedindo a colonização em superfícies tratadas (Alkarri et al., 2024).

Um estudo publicado na National Geographic, demonstrou um grupo de células infectadas com Sars-Cov-2, e a ação das nanopartículas de óxido de ferro nelas, comprovando que essas nanopartículas poderiam ser utilizadas para a prevenção e até mesmo no tratamento. Dentre as citadas pelo estudo, se destacam a família de espécies cujo estão relacionadas a síndrome respiratória aguda grave, como o Sars-CoV, Sars-Cov-2, e a síndrome respiratória do Oriente Médio, Mers-CoV.

**Figura 16.** Imagem microscópica da transmissão de células infectadas com Sars-CoV-2 e tratadas com nanopartículas de óxido de ferro.



**Fonte:** <https://www.nationalgeographicbrasil.com/ciencia/2022/09/covid-19-nanopartículas-sao-alternativa-promissora-contr-a-esta-e-outras-doencas>.

Além disso, outras propriedades podem ser observadas sobre as nanopartículas, neste estudo o objetivo de interesse é a aplicação das nanopartículas (NPs) em revestimentos, e o mais importante nisso é como o material formulado irá se comportar, suas características físicas (cor, cheiro, volume) entre outras como as características mecânicas que podem mensurar a elasticidade do revestimento, e, mais, a eficácia do agente após ser aplicado no revestimento.

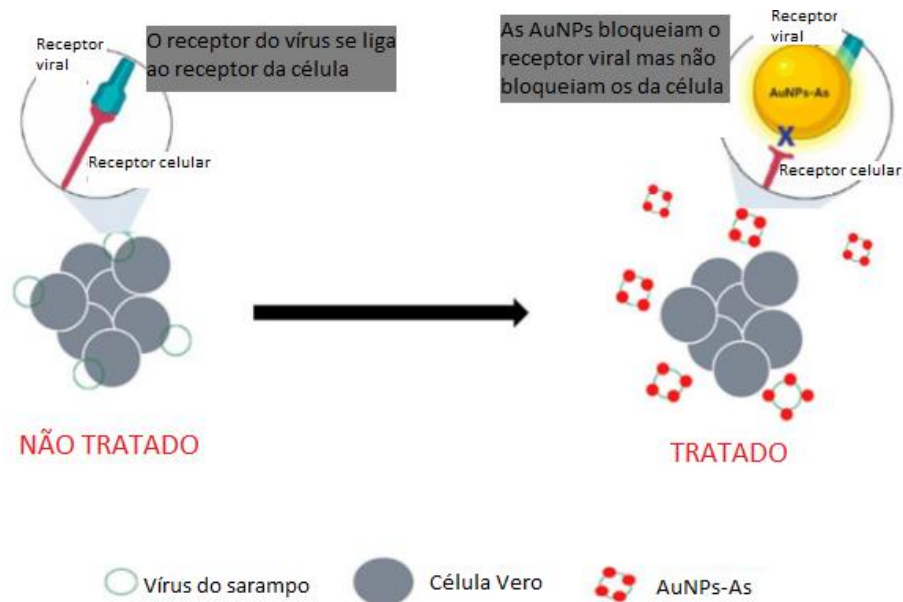
No caso do poliuretano, a adição de nanopartículas melhora as características mecânicas, como resistência à abrasão e estabilidade térmica. Isso permite que o material suporte ambientes com temperaturas elevadas e contato frequente com agentes físicos e químicos agressivos (Santana et al., 2021). A presença de nanopartículas também contribui para a formação de uma matriz polimérica mais coesa, resultando em um material que distribui melhor as tensões e apresenta menor probabilidade de deformação ou desgaste prematuro.

Já a poliureia, quando combinada com nanopartículas metálicas, apresenta propriedades antimicrobianas duradouras e eficazes. Essa combinação é particularmente vantajosa em ambientes que exigem altos padrões de higiene, como hospitais, indústrias alimentícias e sistemas de tratamento de água (Davey, 2021; Katloulkal et al., 2023). A ação antimicrobiana é potencializada pela dopagem das nanopartículas com elementos de terras raras, como lantânio (La) e cério (Ce), que intensificam a eficácia antimicrobiana e contribuem para a durabilidade do revestimento (Li et al., 2021).

Um estudo realizado pela Nanoeach demonstrou a aplicação de nanopartículas consideradas verdes, obtidas através de plantas e reagentes orgânicos. Esse método de síntese é mais sustentável e apresenta compatibilidade com a saúde humana superior em comparação com nanopartículas metálicas convencionais. Essa nanotecnologia permite a prevenção de doenças como a COVID-19, baseada nas propriedades antivirais das nanopartículas de prata (AgNPs) preparadas com extratos de plantas. Aplicações incluem máscaras faciais e revestimentos com AgNPs dispersas, aumentando o potencial de eliminação do vírus ao entrar em contato com as superfícies tratadas.

A Figura 16 ilustra o mecanismo de ação de nanopartículas de ouro (AuNPs) como agente antiviral eficaz contra o vírus do sarampo:

**Figura 17.** Representação da influência virucida das nanopartículas de ouro no vírus do sarampo.



**Fonte:** Adaptado de NAIKOO *et al.*, 2021

As AuNPs interagem com o envelope viral, causando danos estruturais que levam à inativação do vírus. Esse mecanismo tem sido estudado para diversos vírus, incluindo o SARS-CoV-2, responsável pela COVID-19. A utilização de nanopartículas metálicas em revestimentos poliméricos apresenta, portanto, um grande potencial para o desenvolvimento de materiais com propriedades antivirais.

Por este motivo, tais nanopartículas providas por meio deste procedimento, cria uma cadeia, uma limitação de ação, que possui uma ação antiviral comprovada contra o vírus HIV, Hepatite B, Herpes simples tipo I, Chikungunya e influenza, e ainda assim, possuindo uma toxicidade sistemática mínima, sendo, portanto, considerada por diversas fontes como um meio seguro e atóxico de se trabalhar com o material.

## **2.8.2 MECANISMO DE AÇÃO DAS NANOPARTÍCULAS NO CONTROLE MICROBIANO**

As nanopartículas metálicas incorporadas aos revestimentos de poliuretano e poliureia atuam por meio de mecanismos que geram espécies reativas de oxigênio (EROs), como radicais livres, que danificam as paredes celulares e o DNA de microrganismos. Esse processo causa a oxidação de componentes celulares essenciais, levando à morte dos microrganismos. Além disso, as nanopartículas podem interagir com proteínas e ácidos nucleicos, interferindo em processos metabólicos fundamentais (Alkarri et al., 2024).

No poliuretano, a distribuição uniforme das nanopartículas na matriz polimérica é fundamental para maximizar a ação antimicrobiana. A superfície do material torna-se hostil ao crescimento microbiano, impedindo a formação de biofilmes, que são comunidades microbianas altamente resistentes a agentes de limpeza e desinfecção. Isso reduz a necessidade de manutenção e aplicação contínua de agentes químicos, promovendo economia e segurança (Santana et al., 2021).

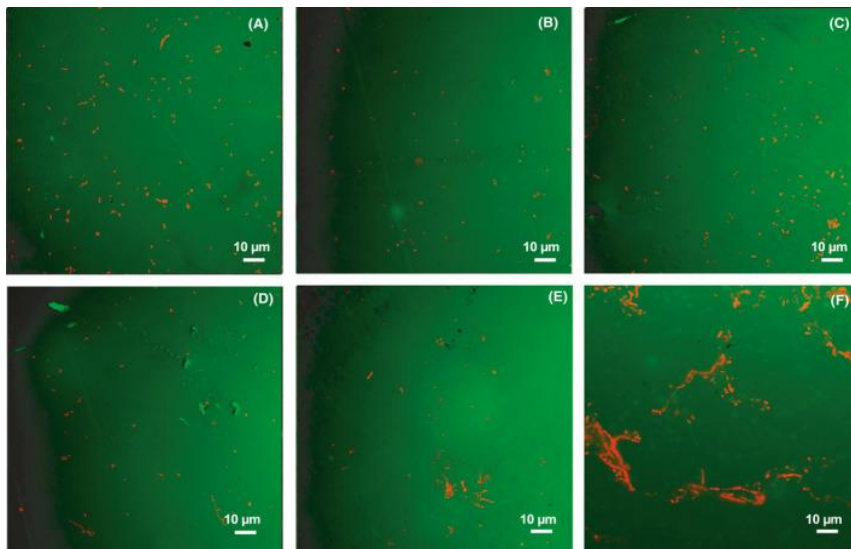
Na poliureia, a incorporação de nanopartículas dopadas com elementos de terras raras intensifica a eficácia antimicrobiana. Estudos mostram que a dopagem com elementos como La e Ce aumenta a geração de EROs e a liberação controlada de íons metálicos, que possuem atividade antimicrobiana adicional. Essa combinação de mecanismos torna os revestimentos altamente eficazes contra uma ampla gama de microrganismos, incluindo bactérias Gram-positivas, Gram-negativas e fungos (Li et al., 2021).

Além das propriedades antimicrobianas, os revestimentos de poliuretano e poliureia com nanopartículas metálicas exibem propriedades antivirais. Estudos indicam que nanopartículas de óxido de ferro e oxihidróxido podem diminuir a replicação de vírus como o SARS-CoV-2. Esse efeito é atribuído ao estresse oxidativo induzido pelas nanopartículas e à interferência no metabolismo intracelular do ferro, essencial para a replicação viral (National Geographic Brasil, 2022).

Essa descoberta abre caminho para o desenvolvimento de materiais capazes de reduzir a transmissão de vírus em superfícies de contato frequente. Aplicações potenciais incluem

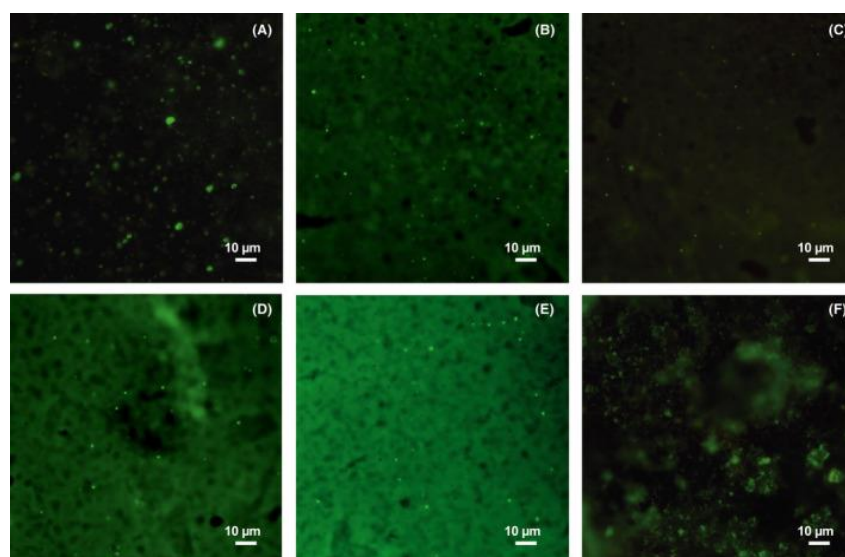
revestimentos em hospitais, escolas, transporte público e espaços públicos, contribuindo para o controle de pandemias e surtos virais.

**Figura 18.** Imagem de biofilme LIVE/DEAD dos revestimentos de poliureia com (A) nano-ZnO, (B) La/ZnO, (C) Ce/ZnO, (D) Pr/ZnO, (E) Gd/ZnO e (F) poliureia pura no reator CDC com *E. coli*.



Fonte: Li et al. (2021).

**Figura 19.** Imagem de biofilme LIVE/DEAD dos revestimentos de poliureia com (A) nano-ZnO, (B) La/ZnO, (C) Ce/ZnO, (D) Pr/ZnO, (E) Gd/ZnO e (F) poliureia pura no reator



Fonte: Li et al. (2021).



As Figuras 16 e 17 apresentam imagens de biofilmes obtidas por coloração LIVE/DEAD, que permitem diferenciar células bacterianas viáveis (em verde) de células mortas (em vermelho). Observa-se que os revestimentos dopados inibem significativamente a formação de biofilmes de *E. coli* e *Pseudomonas*, reduzindo a quantidade de células viáveis na superfície. Isso demonstra a eficácia antimicrobiana dos revestimentos e sua capacidade de prevenir contaminações.

### **2.8.3 IMPACTO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E NA DURABILIDADE**

Além de suas propriedades antimicrobianas, a incorporação de nanopartículas de óxidos metálicos melhora significativamente as propriedades mecânicas do poliuretano expandido. Estudos demonstram que o reforço com nanopartículas aumenta a resistência à abrasão e a estabilidade térmica do material, o que prolonga sua vida útil mesmo em ambientes adversos. A presença de nanopartículas permite a formação de uma matriz mais coesa e resistente, que distribui melhor as tensões e reduz a probabilidade de deformação ou desgaste prematuro. Assim, o material se torna mais adequado para aplicações onde o atrito e o impacto são constantes, como em componentes automotivos e revestimentos de estruturas expostas ao ambiente (Alkarri et al., 2024).

Essas melhorias mecânicas também fazem com que o poliuretano expandido com nanopartículas seja ideal para o uso em ambientes de alta umidade, pois a resistência térmica aumentada impede que o material sofra deformações em temperaturas elevadas ou em ciclos de aquecimento e resfriamento. O resultado é um material mais durável e resistente, com uma gama ampliada de aplicações práticas que vai desde o setor de construção civil até a produção de embalagens duráveis e de alta performance (Santana et al., 2021).

### **2.8.4 PERSPECTIVAS E DESAFIOS NA APLICAÇÃO**

Apesar dos avanços, desafios persistem na aplicação comercial em larga escala desses revestimentos. A síntese e dispersão uniforme das nanopartículas são cruciais para garantir desempenho consistente. Técnicas avançadas de processamento, como ultrassonificação e uso de agentes compatibilizantes, podem ser necessárias para assegurar a distribuição homogênea das nanopartículas na matriz polimérica.

Além disso, é necessário considerar os custos de produção e a segurança dos trabalhadores. A manipulação de nanopartículas requer cuidados específicos, como sistemas de exaustão adequados, equipamentos de proteção individual e treinamento especializado, para evitar riscos à saúde, como inalação ou exposição cutânea.

Outro ponto crítico é a potencial lixiviação das nanopartículas. Ao longo do tempo, partículas podem se desprender do revestimento e entrar em contato com o meio ambiente, apresentando riscos ecotoxicológicos. Estudos de avaliação de risco e desenvolvimento de métodos para imobilização das nanopartículas na matriz polimérica são essenciais para garantir a sustentabilidade desses materiais (Santana et al., 2021).

Regulamentações ambientais e de saúde também podem influenciar a adoção desses materiais. É fundamental que os revestimentos atendam a normas e padrões de segurança, como a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) e órgãos internacionais, para garantir a aceitação no mercado.

### **2.8.5 EFICÁCIA CONTRA O SARS-COV-2**

Em 2022, cientistas espanhóis do Csic descobriram que nanopartículas de óxido de ferro e oxihidróxido podem diminuir a replicação do SARS-CoV-2. Esse efeito se deve ao estresse oxidativo e à interferência no metabolismo intracelular do ferro, sugerindo potencial no tratamento e prevenção da Covid-19. O revestimento das nanopartículas também aumenta sua biocompatibilidade, permitindo que sejam usadas em diagnósticos e em terapias como a hipertermia para tratamento de câncer (National Geographic Brasil, 2022).

A combinação de poliureia e nanopartículas metálicas dopadas com elementos de terras raras representa uma solução inovadora para o desenvolvimento de revestimentos antimicrobianos com propriedades mecânicas aprimoradas que permitem também um ligeiro aprimoramento da eficácia antiviral do agente. Esses materiais oferecem alta resistência à abrasão, estabilidade térmica e uma potente ação antimicrobiana, sendo ideais para aplicações em setores que demandam altos padrões de higiene, como hospitais, indústrias alimentícias e

sistemas de tratamento de água. A dopagem com La e Ce, em particular, mostrou-se altamente eficaz na inativação bacteriana, garantindo durabilidade e eficiência mesmo após ciclos repetidos de uso.

Conclui-se, portanto, que a escolha de um polímero base adequado é crucial para o desempenho final do revestimento antimicrobiano (Tiwari, 2018). A compatibilidade entre o polímero e as nanopartículas influencia diretamente a dispersão e estabilidade das nanopartículas no material, afetando propriedades como adesão, resistência mecânica e eficácia antimicrobiana (Feltrin, 2016). Além disso, é fundamental considerar as características da superfície de aplicação, como rugosidade, energia de superfície e condições ambientais, para garantir uma aderência eficiente e durabilidade do revestimento (Kett et al., 2009). Fatores como custo, facilidade de processamento e impacto ambiental também devem ser levados em conta na seleção do polímero, visando não apenas a performance técnica, mas também a viabilidade econômica e sustentabilidade do produto (Pavinatto et al., 2022).

## **2.9 EFEITO DO AMÔNIO QUARTERNÁRIO EM REVESTIMENTOS**

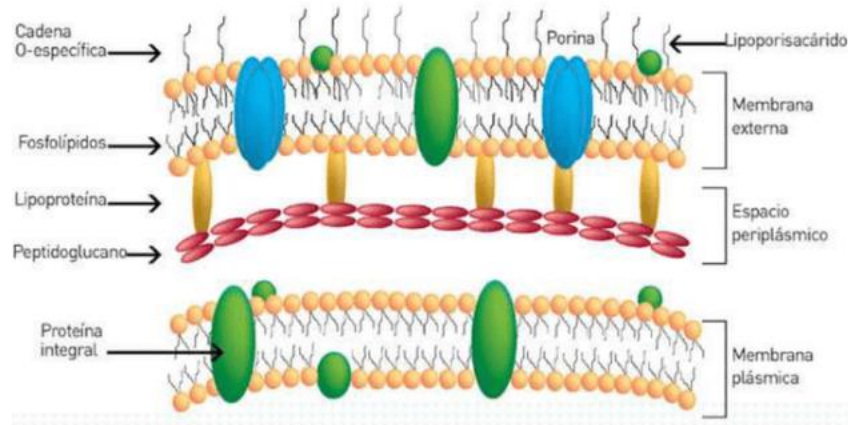
A introdução de compostos de amônio quaternário (QAS) em materiais de revestimento, como a poliureia e o poliuretano, representa um avanço significativo no desenvolvimento de superfícies antimicrobianas. Esses compostos, devido à sua estrutura catiônica, oferecem uma proteção eficaz contra uma ampla gama de patógenos, incluindo bactérias, fungos e vírus encapsulados, como o SARS-CoV-2. As propriedades dos QAS de interagir e desestabilizar as membranas celulares permitem que os revestimentos com esses compostos não apenas eliminem microrganismos rapidamente, mas também ofereçam uma proteção prolongada, essencial em ambientes de alto risco sanitário, como hospitais, indústrias alimentícias e áreas de circulação pública.

### **2.9.1 MECANISMO DE AÇÃO E EFICÁCIA DOS QAS**

Os QAS atuam como biocidas devido à sua habilidade de interagir eletrostaticamente com as membranas celulares dos microrganismos. A presença de um átomo de nitrogênio positivamente carregado na estrutura do QAS permite que ele se ligue à membrana fosfolipídica, promovendo desestabilização e ruptura da célula. Esse mecanismo de ação é

particularmente eficaz em patógenos com membranas frágeis, como vírus encapsulados, onde o QAS desestrutura a camada lipídica que envolve o material genético viral, desativando-o e impedindo sua replicação (Marzullo et al., 2024)

*Figura 20. Composição da bicamada lipídica das membranas celulares, destacando a disposição dos fosfolipídios e proteínas.*



**Fonte:** Marzullo et al., 2024

## 2.9.2 APLICAÇÕES E DESEMPENHO DOS REVESTIMENTOS

O uso de QAS em revestimentos de poliureia e poliuretano tem sido explorado em diversos contextos em que a resistência microbiana e a necessidade de um ambiente seguro são primordiais. Esses revestimentos são especialmente úteis em superfícies de alto contato, como maçanetas, corrimãos, equipamentos médicos e áreas de preparo de alimentos, onde a contaminação pode ocorrer facilmente.

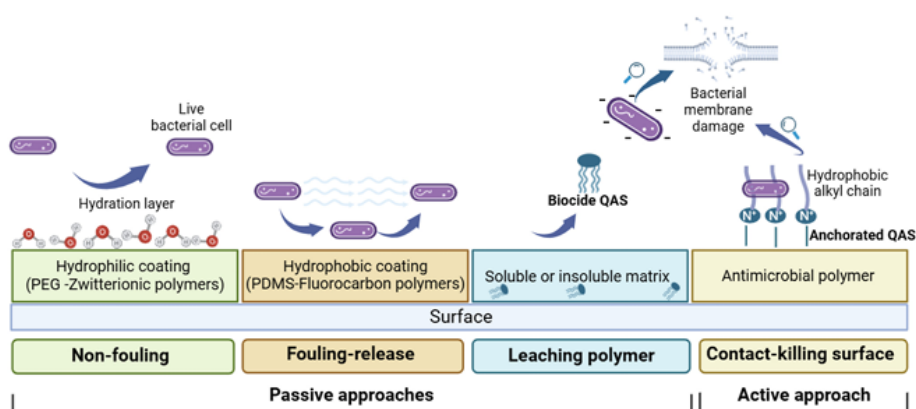
A poliureia com QAS, por sua vez, é valorizada por suas características de cura rápida e resistência a impactos, tornando-a ideal para aplicações em ambientes industriais e hospitalares onde o controle microbiológico contínuo é essencial. Esses revestimentos criam superfícies com capacidade antimicrobiana prolongada, o que significa que, mesmo após repetidas exposições e ciclos de higienização, mantêm sua eficácia. Estudos realizados em ambientes hospitalares demonstraram que a poliureia com QAS pode reduzir drasticamente a carga microbiana em superfícies de alto contato, diminuindo, assim, o risco de infecções nosocomiais.

A resistência ao desgaste também mencionada anteriormente, é uma característica importante dos revestimentos de poliureia, que suportam o uso intensivo sem perder suas propriedades antimicrobianas. Essa durabilidade é particularmente relevante em áreas hospitalares de grande movimento e em unidades de terapia intensiva (UTIs), onde superfícies seguras e de fácil higienização são essenciais para minimizar o risco de contaminação cruzada.

### 2.9.3 RELEVÂNCIA NA SAÚDE PÚBLICA E PREVENÇÃO DE INFECCÕES

A versatilidade do poliuretano o torna uma escolha popular para revestimentos de dispositivos médicos, espumas, adesivos e equipamentos de proteção individual (EPIs). A adição de QAS ao poliuretano proporciona uma barreira antimicrobiana eficaz contra patógenos respiratórios, como o SARS-CoV-2, sendo ideal para superfícies que requerem alta proteção microbiológica. Em hospitais e instalações de saúde, onde dispositivos médicos e superfícies de contato são suscetíveis a contaminação constante, o poliuretano com QAS atua como uma solução prática para reduzir a presença de agentes infecciosos.

*Figura 21. Fluxograma explicativo, que indica a inibição de biofilmes em superfícies de poliuretano com QAS.*



Fonte: Adaptado de Marzullo et al., 2024

A aplicação de poliuretano com QAS em sistemas de ventilação, superfícies de uso recorrente e equipamentos médicos diminui a necessidade de desinfecções frequentes, pois mantém a ação biocida ativa mesmo após repetidos ciclos de uso. Essa eficácia prolongada é

particularmente útil para equipamentos de proteção, como máscaras e luvas, que podem facilmente se tornar vetores de transmissão microbiana em ambientes clínicos e em locais de alta circulação de pessoas.

Embora os benefícios dos QAS em revestimentos antimicrobianos sejam amplamente reconhecidos, seu uso em larga escala levanta questões ambientais, especialmente em relação à lixiviação de partículas e à bioacumulação em ecossistemas aquáticos. A alta eficácia dos QAS em interagir com membranas celulares pode também causar efeitos negativos em organismos aquáticos, afetando a microbiota marinha e do solo. Para mitigar esses riscos, os pesquisadores têm se concentrado em desenvolver formulações de QAS que minimizem a liberação no ambiente, usando compostos com menor solubilidade e aprimorando a estrutura das matrizes de poliureia e poliuretano para melhor retenção dos QAS.

Outros estudos indicam que o uso de QAS derivados de fontes naturais pode representar uma alternativa mais sustentável e menos agressiva ao meio ambiente. Essa abordagem se alinha com as demandas por práticas industriais mais sustentáveis e produtos com menor impacto ambiental, especialmente em aplicações que exigem o uso em larga escala, como revestimentos antimicrobianos em infraestruturas urbanas e hospitalares.

## **2.10 EFEITOS DA QUITOSANA COMO AGENTE E REVESTIMENTO**

A quitosana, derivada da desacetilação da quitina, é um biopolímero catiônico com propriedades antimicrobianas, biodegradáveis e biocompatíveis, características que a tornam uma excelente escolha como agente de revestimento em polímeros, especialmente quando combinada com poliuretano e poliureia. Sua alta biocompatibilidade e biodegradabilidade tornam-na favorável para aplicações em áreas médicas e industriais. Ao se integrar em sistemas de revestimento como poliuretano e poliureia, a quitosana melhora as propriedades antimicrobianas das superfícies, atuando como uma barreira física que inibe a aderência microbiana, essencial para a prevenção de biofilmes em superfícies expostas (Marsico et al., 2024).

Os revestimentos de quitosana também são eficazes em aumentar a resistência química e mecânica dos polímeros. No caso do poliuretano, a combinação com quitosana ajuda a formar

uma matriz mais coesa, o que contribui para a distribuição uniforme das tensões e reduz a probabilidade de desgastes prematuros (Siritongsuk et al., 2022). Em ambientes industriais, esses revestimentos podem suportar condições adversas de temperatura e exposição a produtos químicos, uma vez que a quitosana adiciona uma camada de resistência adicional à degradação, aumentando a durabilidade e estabilidade do poliuretano (Siritongsuk et al., 2022; Marsico et al., 2024).

### **2.10.1 A APLICAÇÃO DOS REVESTIMENTOS A BASE DE QUITOSANA**

Em aplicações de poliureia, a quitosana atua como um agente de reforço, melhorando a adesão do revestimento ao substrato e contribuindo para a uniformidade da aplicação. A poliureia, por sua própria natureza, já é conhecida por suas propriedades de rápida cura e alta resistência mecânica. No entanto, a adição de quitosana permite uma distribuição mais homogênea da estrutura polimérica, o que não só potencializa a resistência do revestimento, mas também otimiza sua ação antimicrobiana devido à melhor integração dos agentes ativos no material (Marsico et al., 2024).

Além disso, a aplicação de quitosana em poliuretano e poliureia oferece vantagens em ambientes que exigem altos padrões de higiene. As propriedades antimicrobianas da quitosana são complementadas pela resistência dos polímeros ao desgaste, o que prolonga a eficácia antimicrobiana do revestimento. Em testes de aderência bacteriana, superfícies tratadas com revestimentos de quitosana mostraram uma redução significativa na colonização bacteriana quando comparadas a superfícies sem tratamento, reforçando sua eficácia como material preventivo contra infecções em superfícies de contato (Siritongsuk et al., 2022).

A quitosana também contribui para a otimização da molhabilidade das superfícies. Quando incorporada a revestimentos de poliuretano, a quitosana reduz o ângulo de contato da superfície, favorecendo a adesão de células em aplicações biomédicas. Esta propriedade é especialmente relevante em revestimentos para implantes, onde uma boa adesão celular é fundamental para a integração com tecidos biológicos. Em implantes ortopédicos, por exemplo, a quitosana ajuda na proliferação celular e promove a formação de uma camada de tecido ao redor do implante, facilitando o processo de osteointegração (Marsico et al., 2024).

No que diz respeito à aplicação em poliuretano, a quitosana apresenta um efeito estabilizador sobre as nanopartículas antimicrobianas, minimizando a sua liberação rápida, o que pode ser tóxico em altas concentrações. Em revestimentos de poliuretano à base de água, a incorporação de quitosana mostrou-se eficaz em criar superfícies autodesinfetantes, que mantêm a atividade bactericida por longos períodos sem a necessidade de reaplicação frequente (Siritongsuk et al., 2022). Estudos indicam que a presença de quitosana permite um controle mais eficaz sobre a liberação de agentes ativos, mantendo a superfície ativa contra bactérias e fungos por até quatro meses em condições ambientais adversas (Siritongsuk et al., 2022).

Outra vantagem da quitosana é a sua capacidade de facilitar a deposição eletroforética (EPD), um método que permite a aplicação de revestimentos finos e uniformes em substratos metálicos e não metálicos. Em poliuretano e poliureia, o uso de EPD com quitosana melhora a aderência e uniformidade do revestimento, além de permitir um controle mais preciso da espessura. Essa técnica é especialmente útil para cobrir superfícies com geometrias complexas, onde a cobertura uniforme é desafiadora (Marsico et al., 2024).

### **2.10.2 QUESTÕES AMBIENTAIS ENVOLVENDO A QUITOSANA**

Em termos de sustentabilidade, a quitosana oferece uma alternativa ecológica aos revestimentos convencionais de polímeros. Ela pode ser extraída de resíduos da indústria pesqueira, como cascas de crustáceos, e de fontes alternativas, como insetos. Isso faz com que sua aplicação em poliuretano e poliureia seja uma escolha sustentável, reduzindo a dependência de fontes petroquímicas e promovendo um ciclo de vida de materiais mais alinhado com a economia circular (Marsico et al., 2024; Siritongsuk et al., 2022).

Os revestimentos de quitosana com poliuretano e poliureia também têm sido considerados para aplicações médicas, especialmente em ambientes hospitalares que exigem barreiras antimicrobianas. Como a quitosana é biocompatível e não tóxica, ela pode ser utilizada em revestimentos para equipamentos e superfícies que estão em contato direto com a pele humana, proporcionando um nível adicional de proteção contra a proliferação de patógenos (Siritongsuk et al., 2022).



Finalmente, a integração de quitosana com poliuretano e poliureia se mostra promissora em aplicações futuras, tanto industriais quanto biomédicas. A versatilidade da quitosana como material de revestimento, combinada com as propriedades dos polímeros, oferece possibilidades para o desenvolvimento de soluções de longa duração e alta eficácia em um amplo espectro de setores. Esses avanços na aplicação da quitosana como revestimento representam um passo significativo em direção a materiais multifuncionais e sustentáveis, que atendem às crescentes demandas de segurança, sustentabilidade e durabilidade nos mercados modernos (Marsico et al., 2024; Siritongsuk et al., 2022).

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Revestimentos antimicrobianos com potencial para inativação do vírus Sars-CoV-2 tem se mostrado possíveis de diferentes formas. Porém, qual seria a melhor opção, sendo economicamente viável, possível de ser produzida em massa (em escala industrial), suas limitações e passiva ao meio ambiente? Esse e outros assuntos relacionados serão discutidos nos tópicos a seguir.

#### **3.1 LIMITE DE COMBINAÇÕES EM REVESTIMENTOS ANTIMICROBIANOS**

Dentre as principais dificuldades encontradas, uma das mais importantes é a limitação de combinações possíveis ao se produzir um revestimento antiviral. As propriedades do agente antiviral ou do polímero podem variar significativamente de acordo com as características de cada componente utilizado na formulação. Isso resulta em uma margem reduzida de combinações viáveis para testes, o que torna o processo de desenvolvimento mais complexo e demorado.

Além disso, a necessidade de otimizar as propriedades mecânicas e funcionais do material leva muitas vezes à adição de aditivos. Esses aditivos são fundamentais para recuperar propriedades que podem ter sido comprometidas durante a formulação, como a elasticidade do material, que é crucial para sua aplicação em diferentes superfícies. Da mesma forma, a eficácia do revestimento contra microrganismos pode ser afetada, exigindo ajustes finos nas concentrações e nas interações entre os componentes.

Outro ponto a considerar é que a pesquisa e o desenvolvimento de novos revestimentos antivirais exigem testes rigorosos de biocompatibilidade e segurança, o que pode limitar ainda mais as opções disponíveis. A interação entre os componentes, a estabilidade a longo prazo do revestimento e a resistência a condições ambientais adversas são fatores que complicam ainda mais o processo. Portanto, a busca por um revestimento antiviral ideal é um desafio contínuo que demanda inovação e abordagens multidisciplinares.

### **3.2 ANÁLISE E ESTUDO DE CASO**

Ao decorrer dessa pesquisa, foram estudados diversos agentes dentre os quais apresentavam características inferiores, outras, superiores, e o objetivo desta seção será um estudo mais aprofundado, uma análise de casos possíveis.

Visto ser um trabalho de revisão de literatura, este capítulo é meramente especulativo com base em argumentações fundadas a partir de artigos publicados sobre o assunto e/ou relacionados.

### **3.3 ESCOLHA DO REVESTIMENTO POLIMÉRICO**

A escolha do revestimento feita aqui demonstra a qualidade em amplos aspectos de um polímero, no contexto de serem utilizadas com um agente antimicrobiano. A versatilidade dos polímeros permite que sejam projetados para atender a requisitos específicos, como resistência à abrasão, flexibilidade e adesão a diferentes superfícies. Quando combinados com um agente antimicrobiano eficaz, esses polímeros não apenas oferecem proteção contra a contaminação microbiana, mas também contribuem para a durabilidade e a funcionalidade do revestimento.

Além disso, a seleção adequada do polímero é crucial para garantir a liberação controlada do agente antimicrobiano, maximizando sua eficácia ao longo do tempo. Isso se revela especialmente relevante em:

- aplicações em ambientes com alta demanda de higiene: como hospitais, indústrias alimentícias e transporte público;
- A combinação de propriedades mecânicas e funcionais do polímero.

Ademais, a capacidade de personalização do revestimento permite ajustes que atendam a necessidades específicas de diferentes setores. Essa adaptabilidade é um fator-chave para a inovação em materiais, possibilitando o desenvolvimento de soluções que se alinhem com as exigências de eficiência, segurança e custo-benefício.

### **3.3.1 EFICÁCIA E QUALIDADE DO REVESTIMENTO**

A escolha do revestimento não é apenas uma questão de funcionalidade, mas também de estratégia em um mercado que demanda produtos eficazes e de alta qualidade. O desenvolvimento contínuo de novas formulações e a pesquisa sobre a interação entre polímeros e agentes antimicrobianos são essenciais para avançar nessa área, abrindo caminho para inovações que possam impactar positivamente a saúde pública e a qualidade de vida.

Assim, foi proposta a seguinte solução: o poliuretano em sua forma convencional, formulado em uma base aquosa, que pode ser aplicado facilmente com um borrifador de plástico, conferindo versatilidade ao produto. É possível ajustar diferentes concentrações do polímero com água, alcançando um ponto em que o produto se torna econômico, fácil de produzir e apresenta baixa toxicidade em caso de acidentes. A aplicação é prática e ideal para uso doméstico, permitindo que um pequeno frasco de 300 ml cubra grandes superfícies por longos períodos.

### **3.4 ESCOLHA DO AGENTE ANTIMICROBIANO**

A seleção de um agente antimicrobiano é um passo crucial no desenvolvimento de revestimentos autodesinfetantes eficazes. É fundamental que o agente escolhido possua amplo espectro de ação contra diferentes microrganismos patogênicos, estabilidade química e compatibilidade com os materiais aos quais será aplicado. Além disso, deve apresentar baixa toxicidade para células humanas e mínimo impacto ambiental.

As nanopartículas de prata (AgNPs) destacam-se como agentes antimicrobianos potentes devido à sua eficácia mesmo em baixas concentrações. Sua atividade antimicrobiana se deve tanto à liberação de íons de prata, que interagem com componentes celulares bacterianos, quanto ao efeito das próprias nanopartículas sobre as membranas celulares. Isso

torna as AgNPs eficazes contra uma ampla gama de bactérias, incluindo cepas resistentes a antibióticos.

Outro agente promissor é a quitosana, um biopolímero derivado da quitina, abundante em exoesqueletos de crustáceos e insetos. A quitosana possui propriedades antimicrobianas intrínsecas, além de ser biodegradável e biocompatível. Sua ação antimicrobiana está relacionada à sua capacidade de interagir com a membrana celular dos microrganismos, aumentando a permeabilidade e levando à morte celular.

Portanto, a combinação de AgNPs com quitosana oferece uma abordagem sinérgica, potencializando a atividade antimicrobiana e superando limitações individuais. Essa combinação permite a criação de revestimentos com eficácia prolongada, estabilidade aprimorada e menor toxicidade, atendendo aos requisitos essenciais para aplicações práticas em superfícies diversas.

### **3.4.1 AGENTES ANTIMICROBIANOS “HÍBRIDOS”**

Os agentes microbianos "híbridos" referem-se à combinação de diferentes materiais antimicrobianos para obter um efeito sinérgico e otimizado. No contexto dos revestimentos autodesinfetantes, a integração de AgNPs com quitosana representa uma estratégia eficaz para melhorar a performance antimicrobiana e a estabilidade do revestimento.

A quitosana atua como um agente estabilizador para as AgNPs, prevenindo sua agregação e sedimentação, o que é essencial para manter a atividade antimicrobiana uniforme na superfície. Além disso, a quitosana possui grupos funcionais que permitem interações eletrostáticas com as nanopartículas de prata, resultando em uma distribuição homogênea no revestimento.

Essa combinação híbrida também favorece a liberação controlada de íons de prata, prolongando o efeito antimicrobiano ao longo do tempo. Isso é particularmente importante para aplicações onde é necessário um efeito duradouro, reduzindo a necessidade de reaplicações frequentes e garantindo proteção contínua contra microrganismos patogênicos.

Em suma, os agentes microbianos híbridos baseados em AgNPs e quitosana proporcionam uma solução inovadora e eficiente para o desenvolvimento de revestimentos antimicrobianos avançados. Essa abordagem combina as vantagens de ambos os materiais, resultando em produtos com maior eficácia, estabilidade e segurança.

### **3.4.2 NANOCOMPÓSITO DE NANOPARTÍCULAS E QUITOSANA**

O nanocompósito formado por nanopartículas de prata e quitosana é uma classe de material que une as propriedades antimicrobianas das AgNPs com as características físicas e biológicas da quitosana. A síntese desse nanocompósito envolve a mistura controlada das nanopartículas com a solução de quitosana, permitindo interações a nível molecular que resultam em um material homogêneo e estável.

A presença da quitosana no nanocompósito desempenha um papel crucial na estabilização das AgNPs, evitando sua agregação e garantindo uma distribuição uniforme no revestimento. Além disso, a quitosana pode modular a liberação dos íons de prata, proporcionando uma ação antimicrobiana prolongada e eficaz contra uma variedade de patógenos. Do ponto de vista mecânico, o nanocompósito apresenta melhorias significativas em termos de aderência e flexibilidade do revestimento. A quitosana contribui para a formação de um filme contínuo e resistente, enquanto as AgNPs garantem a atividade antimicrobiana necessária. Essa sinergia resulta em revestimentos com propriedades físicas adequadas para diversas aplicações práticas.

Portanto, o nanocompósito de nanopartículas de prata e quitosana representa uma abordagem promissora na área de revestimentos autodesinfetantes. Sua eficácia comprovada, aliada à facilidade de produção e aplicabilidade, o torna uma opção viável para o controle de infecções em ambientes clínicos e industriais.

### **3.5 COMPOSIÇÃO COMPLETA DO REVESTIMENTO ANTIMICROBIANO**

A composição completa do revestimento antimicrobiano envolve a integração do nanocompósito de AgNPs e quitosana em uma matriz polimérica adequada, como o poliuretano

à base de água (WPU). O WPU é escolhido por suas propriedades de adesão, flexibilidade e por ser ambientalmente amigável, além de facilitar a aplicação em diversas superfícies.

De acordo com Siritongsuk e sua equipe no trabalho intitulado: “Synthesis and Application of AgNPs-Chitosan Composite as a Self-Disinfecting Coating in Water-Based Polyurethane”, que analisa e comenta sobre a síntese e aplicação de um composto de AgNPs-Quitosana como revestimento auto desinfetante em poliuretano à base de água, diversos testes e proporções feitos, com o intuito de se obter a fórmula mais estável e adequada possível.

**Tabela 1.** (Adaptado) Fórmulas para a composição de um revestimento antimicrobiano auto desinfetante.

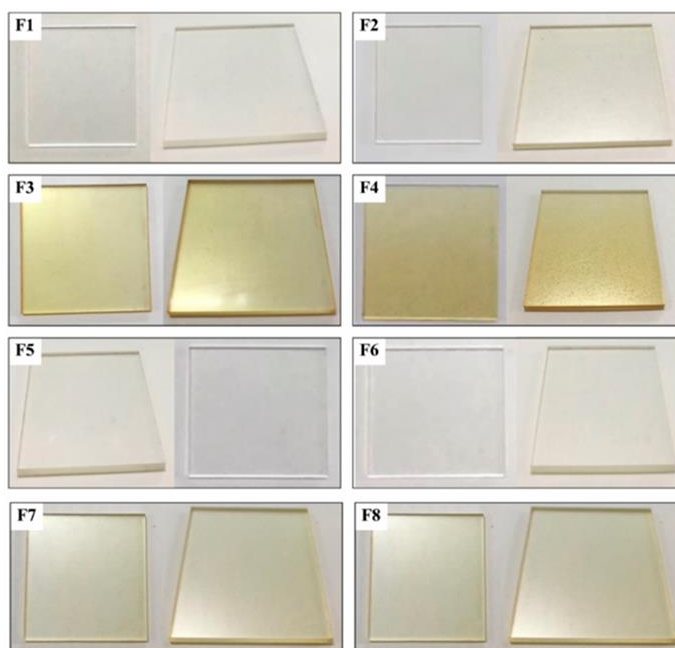
<b>Fórmula (F)</b>	<b>Conc. de AgNPs (µg/mL)</b>	<b>Conc. de Quitosana (µg/mL)</b>	<b>Percentual de Poliuretano a Base de Agua</b>
<b>F1</b>	32,0	0,0	50%
<b>F2</b>	128,0	0,0	50%
<b>F3</b>	320,0	0,0	50%
<b>F4</b>	1280,0	0,0	50%
<b>F5</b>	32,0	39,0	50%
<b>F6</b>	128,0	39,0	50%
<b>F7</b>	320,0	39,0	50%
<b>F8</b>	1280,0	39,0	50%

**Fonte:** Siritongsuk et, al.

Na formulação do revestimento, é crucial determinar as concentrações ideais de AgNPs, quitosana e WPU para alcançar um equilíbrio entre eficácia antimicrobiana e propriedades físicas desejadas. Estudos demonstram que concentrações de AgNPs em torno de 1280 µg/mL e quitosana a 39 µg/mL em 50% v/v de WPU resultam em revestimentos com elevada atividade antimicrobiana e boa estabilidade.

Abaixo estão realizados todos os testes com o revestimento, de maneira respectiva, organizado assim como demonstrado na tabela 1, as fórmulas de F1 a F8 aplicadas na superfície de uma placa de acrílico 5x5cm<sup>2</sup>.

**Figura 22.** Aplicação das fórmulas dos revestimentos de poliuretano a base de água em uma superfície de acrílico.



**Fonte:** Siritongsuk et, al.

Testes baseados na norma ISO 22196 confirmam que tais formulações inibem eficazmente bactérias como *Escherichia coli* O157<sup>3</sup> e *Staphylococcus aureus* ATCC25722<sup>4</sup>, tanto a curto quanto a longo prazo. Além disso, a liberação controlada de íons de prata do revestimento garante uma ação prolongada sem atingir níveis tóxicos para células humanas, conforme demonstrado em testes citotóxicos com células NHDF.

---

<sup>3</sup> Cepa específica da bactéria *E. coli*. A designação "O157" refere-se ao tipo de antígeno presente na superfície bacteriana, que é utilizado para diferenciar essa cepa de outras de *E. coli*.

<sup>4</sup> Cepa padronizada utilizada em estudos para assegurar consistência e confiabilidade nos resultados.

Assim, a composição completa do revestimento antimicrobiano consiste em uma matriz de WPU contendo o nanocompósito de AgNPs e quitosana, resultando em um produto eficaz, seguro e adequado para diversas aplicações que demandam controle microbiano.

### **3.6 DETALHES E CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A implementação de revestimentos antimicrobianos eficazes requer atenção a detalhes como o método de aplicação, condições de secagem e espessura do filme. A aplicação por pulverização usando equipamentos adequados assegura uma distribuição uniforme do revestimento. Controlar a espessura, geralmente entre 5–10  $\mu\text{m}$ , é essencial para garantir a eficácia antimicrobiana e a adesão adequada ao substrato.

Considerações sobre a liberação de íons de prata são fundamentais para balancear a atividade antimicrobiana com a segurança biológica. Estudos indicam que a inclusão de quitosana no revestimento reduz significativamente a liberação de íons de prata, minimizando a citotoxicidade sem comprometer a eficácia contra bactérias patogênicas.

Além disso, é importante realizar avaliações a longo prazo da eficácia antimicrobiana e da estabilidade do revestimento em condições reais de uso. Isso inclui a exposição a fatores ambientais e a interação com diferentes tipos de microrganismos, garantindo que o revestimento mantenha sua funcionalidade ao longo do tempo.

Em conclusão, o desenvolvimento de revestimentos autodesinfetantes baseados em nanocompósitos de AgNPs e quitosana em matriz de WPU representa um avanço significativo no controle de infecções em superfícies. A combinação de eficácia antimicrobiana, segurança e viabilidade prática posiciona esses materiais como candidatos promissores para aplicações em ambientes de saúde, industriais e públicos.

## **4. PESQUISAS E TRABALHOS FUTUROS**

Além das combinações já mencionadas, outras possibilidades podem ser exploradas, como por exemplo:



- **Uso de PVA com Nanopartículas de Cobre:** O cobre possui reconhecidas propriedades antimicrobianas e, quando incorporado ao PVA, pode potencializar a eficácia do revestimento contra uma ampla gama de microrganismos (Prado et al., 2012; Vega-Jiménez et al., 2018).
- **Integração de Nanopartículas de Óxido de Titânio:** Conhecidas por sua atividade fotocatalítica, essas nanopartículas podem ser combinadas com polímeros para criar revestimentos que ativam suas propriedades antimicrobianas na presença de luz UV (Vega-Jiménez et al., 2018; Dias & Júnior, 2006).
- **Desenvolvimento de Hidrogéis Antimicrobianos:** A combinação de PVA e quitosana pode resultar em hidrogéis com capacidade de liberação controlada de agentes antimicrobianos, oferecendo proteção prolongada (Paolini, 2023; Pavinatto et al., 2022).

Essas propostas têm o potencial de aprimorar a eficácia dos revestimentos antimicrobianos, especialmente no contexto atual, onde a higienização e a proteção de superfícies são cruciais para a saúde pública (WHO, 2020; Fumagalli et al., 2023). A exploração de novas combinações de materiais e técnicas de aplicação avançadas contribui para a criação de soluções sustentáveis, eficazes e duradouras (Tiwari, 2018; Liu et al., 2021).

## 5. CONCLUSÃO

A revisão de literatura sobre revestimentos poliméricos com propriedades antimicrobianas evidenciou o potencial desses materiais para inativar microrganismos em superfícies de alto contato, uma necessidade cada vez mais presente com o aumento das demandas por segurança e higiene. A pandemia de COVID-19 revelou as limitações dos métodos tradicionais de desinfecção, os quais, muitas vezes, não possuem durabilidade suficiente ou resistência à abrasão, enfatizando a importância de alternativas que combinem eficácia prolongada e versatilidade de aplicação.

Dentre as alternativas promissoras, o poliuretano à base de água (WPU) destaca-se como uma matriz polimérica eficaz para revestimentos antimicrobianos. Sua formulação com nanopartículas de prata (AgNPs) e quitosana mostrou-se altamente eficaz na inativação do SARS-CoV-2 e outros patógenos, além de oferecer flexibilidade, aderência e segurança ambiental. A facilidade de aplicação do revestimento, especialmente por pulverização, torna-o uma solução prática para diferentes superfícies e ambientes, e sua formulação aquosa reduz o impacto ambiental, facilitando o uso em larga escala em locais como hospitais e transportes públicos.

Estudos indicam que uma combinação de aproximadamente 1280  $\mu\text{g/mL}$  de AgNPs e 39  $\mu\text{g/mL}$  de quitosana, em 50% v/v de WPU, resulta em um revestimento estável, eficaz e seguro para a maioria das aplicações. O uso de quitosana não só estabiliza as nanopartículas de prata, prevenindo sua agregação, mas também proporciona uma liberação controlada dos íons antimicrobianos ao longo do tempo, garantindo proteção duradoura e minimizando os riscos de citotoxicidade. Esse equilíbrio entre a eficácia antimicrobiana e a segurança biológica é essencial para a viabilidade do revestimento em contextos de contato frequente.

Em conclusão, a combinação de WPU com AgNPs e quitosana representa um avanço significativo no desenvolvimento de revestimentos antimicrobianos duráveis e de aplicação prática, constituindo uma estratégia eficaz para o controle da disseminação de patógenos em superfícies de contato frequente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Bastos, L. (2014). **Análise Comparativa de Sistemas de Impermeabilização.**
2. BESSO, M.M. **Tin salts of citric acid and method of preparation.** US Patent no 3123120, 19/10/1965.
3. Davey, R. (2021). **Antimicrobial Polyurea Coatings With Rare Earth-Doped Nano-Zinc Oxide Particles.** Microbial Biotechnology.
4. Feltrin, A. C. (2016). **Desenvolvimento e Validação de Metodologia para análise do efeito Antimicrobiano em Revestimento Cerâmico com Efeito Fotocatalítico.**
5. Vega-Jiménez et al., (2018). **Mecanosíntesis y efecto antimicrobiano de óxidos metálicos nanoestructurados.**
6. Fumagalli, L., Strizzi, S., Cappelletti, G., Artasensi, A. & Casiraghi, A. (2023). **Evaluation of in vitro SARS-CoV-2 inactivation by a new quaternary ammonium compound: Bromiphen bromide.**
7. GARCIA, Marcus Vinicius Dias et al. **Síntese, caracterização e estabilização de nanopartículas de prata para aplicações bactericidas em têxteis.** [sn], 2011.
8. Ijaz, M. K., Whitehead, K., Srinivasan, V., McKinney, J., Rubino, J. R., Ripley, M. & Jones, C. (2021). **Microbicidal actives with virucidal efficacy against SARS-CoV-2.**
9. GERBA, et al 2015. **Biocidas de amônio quaternário: eficácia na aplicação. Biocidas de amônio quaternário: eficácia na aplicação.**
10. GREGGIO, G., 2023. **Prevenção da COVID-19: nanopartículas de óxidos de cobre ou dióxido de titânio na inativação da proteína spike do coronavírus em superfícies!**
11. Kampf, G.; Todt, D.; Pfaender, S.; Steinmann, E. **Persistence of coronaviruses on inanimate surfaces and their inactivation with biocidal agents.** Journal of Hospital Infection 2020, 104, 246.
12. Katloukal et al., (2023). **Antiviral Activity of Zinc Oxide Nanoparticles against SARS-CoV-2**
13. Kett, P., et al. (2009), **Structural changes in a polyelectrolyte multilayer assembly investigated by reflection absorption infrared spectroscopy and sum frequency generation spectroscopy.**
14. Janotti, A.; Van de Walle, C.G. **Fundamentals of zinc oxide as a semiconductor.** Reports on Progress in Physics 2009, 72, 126501.

15. Dias, C. A. C. M.; Júnior, H. R. P. **Produção e caracterização de filmes finos de óxido de zinco intrínsecos e dopados com alumínio e boro.** Revista Matéria 2006, 11, 267. [CrossRef]
16. Liu, Y., Li, Y., Yao, B., Narasimalu, S. & Dong, Z. (2021). **Rapid preparation and antimicrobial activity of polyurea coatings with RE-Doped nano-ZnO.** Microbial Biotechnology.
17. Marcone, G **AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE ANTIMICROBIANA DE NANOPARTÍCULAS DE PRATA**
18. Marsico, M.; Azari, R.; Curcio, M.; Teghil, M.; Triunfo, M.; Falabella, P.; Boccaccini, A. R. & Bonis, A. (2024). **Enhancing the Antibacterial Properties of Chitosan Coatings: Ag@Chitosan and Chitosan from Insects.**
19. **O QUE é nanotecnologia.** Canaltech, s.d. Disponível em: < <https://bit.ly/2DpPYWE> >. Acesso em: 4 set. 2020.
20. Pascall, M. A., & Lee, J. (2020). **Reduction in microbial survival on food contact surfaces by a spray coated polymerized quaternary ammonium compound.**
21. PAVINATTO, A. et al., 2022. **ANTIMICROBIAL ACTIVITY OF CHITOSAN AND ITS DERIVATIVES: INFLUENCE OF ITS STRUCTURAL CHARACTERISTICS.**
22. Paolini, N. A., (2023). **Development of microparticles of chitosan and pomegranate extract and evaluation of its antimicrobial potential in polymeric films.** Repositório Institucional da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (RIUT).
23. Pereira A.A., Araújo E.A., Ribeiro L., Passos F.R., Botrel D.A., Bernardes P.C. & Andrade N.J.D. 2013. **Otimização da produção de nanopartículas de prata utilizando nova síntese e avaliação da sua ação sanitizante.** Biosci. J. 29(2):506-515.
24. Petica A., Gavriiliu S., Lungu M., Buruntea N. & Panzaru C. 2008. **Colloidal silver solutions with antimicrobial properties.** Mater. Sci. Eng. 152(1-3):22-27. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mseb.2008.06.021>.
25. Prado, V., Vidal, R., Durán, C. (2012). **Aplicación de la capacidad bactericida del cobre 43.** [www.mundonano.unam.mx](http://www.mundonano.unam.mx)
26. Santos, E. N., Montoro, L. A., Freitas, R. P., Silva, H., & Sinisterra, R. D. (2020). **Produtos Desinfetantes para o Enfrentamento da Pandemia de COVID-19.** Revista Virtual de Química, vol.15, nº 5.

27. SILVESTRY-RODRIGUEZ, N.; SICAIROS-RUELAS, E. E.; GERBA, C. P.; BRIGHT, K. R. **Silver as a Disinfectant.** Rev Environ Contam Toxicol. 2007. v. 191. p. 23–45.
28. Silva, M. C., 2021. **AVALIAÇÃO DO TRATAMENTO ANTIMICROBIANO COM NANOPARTÍCULAS DE PRATA APLICADAS EM SUBSTRATOS TÊXTEIS.**
29. SILVA, T. E. M., 2021. **SÍNTESE DE NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINCO (ZnO) EMPREGANDO ENERGIA MICRO-ONDAS.**
30. Sportelli, M. C.; Izzi, M.; Loconsole, D.; Sallustio, A.; Picca, R. A.; Felici, R.; Chironna, M.; Cioffi, N. (2022). **On the Efficacy of ZnO Nanostructures against SARS-CoV-2.** International Journal of Molecular Sciences.
31. Siritongsuk, P.; Thammawithan, S.; Srichaiyapol, O Nasompag, S.; Pongha, P.; Daduang, S.; Klaynongsruang, S. & Patramanon, R. (2022). **Synthesis and Application of AgNPs-Chitosan Composite as a Self-Disinfecting Coating in Water-Based Polyurethane.**
32. SOUZA, Gustavo Duarte de; RODRIGUES, Mônica Aparecida; SILVA, Priscila Pereira; GUERRA, Wendell. **Prata: breve histórico, propriedades e aplicações.** Educación química, Elsevier, v. 24, n. 1, p. 14–16, 2013
33. Tiwari, A. (2018). **Handbook of Antimicrobial Coatings.** Elsevier.
34. Tecnologia de materiais (2013). [http://www.tecnologiademateriais.com.br/consultas\\_tm/poliureia/imppoliureia.html](http://www.tecnologiademateriais.com.br/consultas_tm/poliureia/imppoliureia.html). Consultado a 29 de dezembro de 2013.
35. TORTORA, G. J.; FUNKE B. R.; CASE C. L. **Microbiologia.** Artmed, 2005
36. WHO. **Coronavirus disease (COVID-19) weekly epidemiological update and weekly operational update.**
37. Wolfgruber, S.; Rieger, J.; Cardozo, O.; Punz, B.; Himly, M.; Stingl, A.; Farias, P. M. A.; Abuja, P. M.; Zatloukal, K. (2023). **Antiviral Activity of Zinc Oxide Nanoparticles against SARS-CoV-2.** International Journal of Molecular Sciences.
38. WOLD, Aaron; DWIGHT, Kirby. **Solid state chemistry: synthesis, structure, and properties of selected oxides and sulfides.** [S.l.]: Springer, 1993.
39. Xiling, G., Yin, C., Ling, W., Xiaosong, W., Jingjing, F., Fang, L., Xiaoyan, Z., Yiyue, Z., Ying, C., Lunbiao, C., Liubo, Z., Hong, S., & Yan, X. (2021). **In vitro inactivation of SARS-CoV-2 by commonly used disinfection products and methods.**

40. Younes, I.; Sellimi, S.; Rinaudo, M.; Jellouli, K.; Nasri, M.; *Int. J. Food Microbiol.* 2014, 185, 57. **Influence of acetylation degree and molecular weight of homogeneous chitosans on antibacterial and antifungal activities.**
41. NAIKOO, Gowhar A. *et al.* **Bioinspired and green synthesis of nanoparticles from plant extracts with antiviral and antimicrobial properties: a critical review.** *Journal Of Saudi Chemical Society*, v. 25, n. 9, p. 101304, 2021.