

**MATERIAIS CIMENTÍCIOS
FUNCIONALIZADOS COM
NANO-TIO₂ PARA
CONTROLE DE BIOFILMES
MICROBIANOS:
MECANISMOS,
DESEMPENHO, MÉTODOS
DE AVALIAÇÃO E
PERSPECTIVAS DE
PESQUISA**

**NANO-TIO₂-FUNCTIONALIZED CEMENTITIOUS MATERIALS FOR
MICROBIAL BIOFILM CONTROL: MECHANISMS, PERFORMANCE,
ASSESSMENT METHODS AND RESEARCH PERSPECTIVES**

Ciências Biológicas, Engenharias • 01/09/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/788143974](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/788143974)

RESUMO

A colonização microbiana de superfícies cimentícias pode favorecer biodeterioração, alterações estéticas e problemas de higiene em ambientes úmidos e críticos. Esta revisão crítica analisa o emprego de dióxido de titânio em escala nanométrica (nano-TiO₂) como fase funcional de materiais cimentícios com atividade fotocatalítica antimicrobiana e antibiofilme. Foi construído um mapa expandido de evidências com 74 estudos primários, organizado em três níveis: 18 trabalhos com evidência microbiana ou antifouling direta, seis estudos de biofilme e biodeterioração em matrizes cimentícias e 50 estudos mecanísticos sobre hidratação, microestrutura, dispersão, fotocatalise, envelhecimento e ativação por luz visível. A síntese demonstra que o desempenho não é determinado apenas pelo teor nominal de TiO₂, mas pela fração fotoativa acessível na superfície, pelas características da matriz, pela irradiância, pelo microrganismo, pelo estado do biofilme e pelo método de avaliação. Os resultados também evidenciam que atividade antibacteriana em células planctônicas não equivale à ação antibiofilme. Propõe-se um fluxo experimental padronizado que integra caracterização do material, dosimetria luminosa, quantificação de células sésseis, endpoints específicos de biofilme e ensaios de envelhecimento. Conclui-se que materiais cimentícios com nano-TiO₂ apresentam potencial para controle microbiano, porém sua validação requer protocolos mais realistas, comparáveis e orientados à durabilidade.

Palavras-chave: dióxido de titânio; materiais cimentícios; fotocatalise; biofilmes microbianos; superfícies antimicrobianas.

ABSTRACT

Microbial colonization of cementitious surfaces can promote biodeterioration, aesthetic changes and hygiene concerns in humid and biologically sensitive environments. This critical review examines

nanoscale titanium dioxide (nano-TiO₂) as a functional phase in cementitious materials designed for photocatalytic antimicrobial and antibiofilm activity. An expanded evidence map comprising 74 primary studies was organized into three levels: 18 studies with direct microbial or antifouling evidence, six studies addressing biofilm development and biodeterioration on cementitious matrices, and 50 mechanistic studies on hydration, microstructure, dispersion, photocatalysis, ageing and visible-light activation. The synthesis shows that performance is not governed solely by nominal TiO₂ dosage, but by the surface-accessible photoactive fraction, matrix characteristics, irradiance, microorganism type, biofilm state and assessment method. The evidence also demonstrates that antibacterial activity against planktonic cells cannot be considered equivalent to antibiofilm performance. A standardized experimental workflow is proposed integrating material characterization, light dosimetry, sessile-cell quantification, biofilm-specific endpoints and ageing tests. TiO₂-functionalized cementitious materials show relevant potential for microbial control, but robust validation requires more realistic, comparable and durability-oriented protocols.

Keywords: titanium dioxide; cementitious materials; photocatalysis; microbial biofilms; antimicrobial surfaces.

1. INTRODUÇÃO

Materiais cimentícios apresentam elevada durabilidade em diferentes condições de serviço, porém suas superfícies podem tornar-se biologicamente receptivas quando umidade, nutrientes, rugosidade e exposição ambiental criam condições favoráveis à adesão microbiana. Após a adesão, os microrganismos podem organizar-se em biofilmes, comunidades estruturadas envolvidas

por substâncias poliméricas extracelulares que alteram a transferência de massa, retêm água e nutrientes e aumentam a tolerância a estresses ambientais. Em superfícies do ambiente construído, essa colonização pode provocar manchas, modificações de molhabilidade e química superficial, perda estética e, em condições favoráveis, contribuir para processos de biodeterioração química e física (Ukrainczyk et al., 2018; Perez; Lors; Erable, 2022).

A fotocatalise com dióxido de titânio (TiO_2) constitui uma das estratégias mais estudadas para conferir funcionalidades de autolimpeza e depoluição a materiais à base de cimento. O TiO_2 apresenta estabilidade química, fotoatividade consolidada e compatibilidade com matrizes minerais. Quando irradiado com fótons de energia suficiente, o semicondutor gera pares elétron-lacuna capazes de participar de reações redox superficiais e produzir espécies reativas de oxigênio, como radicais hidroxila, espécies derivadas do superóxido e peróxido de hidrogênio. Essas espécies podem oxidar compostos orgânicos e danificar estruturas celulares microbianas (Fujishima; Honda, 1972; Hoffmann et al., 1995; Cho et al., 2004).

Entretanto, a transposição da química fotocatalítica para o controle microbiano em cimento não é direta. A matriz pode encapsular partículas, alterar sua química superficial durante a hidratação e reduzir a fração fotoativa exposta. Além disso, a inativação depende do tipo de microrganismo, do estado fisiológico, da densidade do inóculo, da geometria de contato, da umidade e das condições de irradiação. Ensaios que demonstram redução de células planctônicas não necessariamente comprovam prevenção ou erradicação de biofilmes maduros (Chen; Poon, 2009; Hamidi; Aslani, 2019; Perez; Lors; Erable, 2022).

As revisões amplas sobre compósitos cimentícios fotocatalíticos mostram que as aplicações de autolimpeza e remoção de poluentes são mais consolidadas do que as aplicações antimicrobianas. Ao mesmo tempo, a literatura metodológica sobre biofilmes em materiais cimentícios evidencia a necessidade de combinar técnicas estruturais, químicas e microbiológicas. Permanece, portanto, a lacuna de uma síntese centrada na integração entre nano-TiO₂, matriz cimentícia, fotocatalise, adesão microbiana e biofilme (Hamidi; Aslani, 2019; Hamdany et al., 2022; Perez; Loris; Erable, 2022).

Diante desse cenário, o objetivo desta revisão é analisar criticamente os mecanismos e os fatores experimentais que governam o controle microbiano por materiais cimentícios funcionalizados com nano-TiO₂, diferenciar os níveis de evidência entre atividade antibacteriana, antiadesão e antibiofilme, comparar os principais métodos de avaliação e propor um fluxo experimental padronizado para estudos futuros. A hipótese conceitual adotada é que o desempenho antibiofilme resulta da interação entre propriedades do TiO₂, microestrutura da matriz, condições de ativação luminosa, características do microrganismo, estado do biofilme e desenho do ensaio.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA

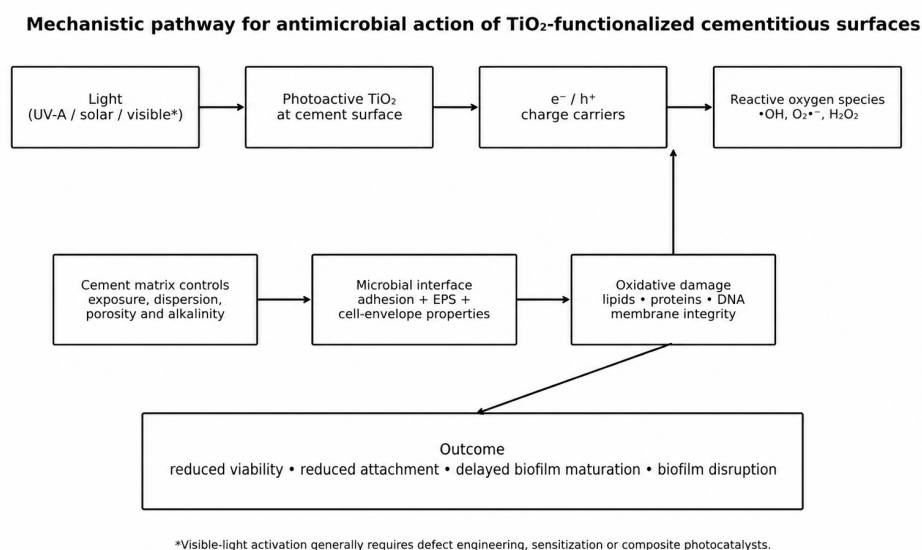
2.1. Fundamentos Fotocatalíticos da Inativação Microbiana

Anatase e rutilo são as fases cristalinas do TiO₂ mais relevantes para aplicações fotocatalíticas. Quando o material absorve fótons com energia igual ou superior à sua energia efetiva de band gap, elétrons são promovidos à banda de condução e lacunas permanecem na banda de valência. Esses portadores de carga podem recombinar-se

ou migrar até a superfície, onde participam de reações de oxidação e redução. As lacunas oxidam água ou grupos hidroxila adsorvidos, enquanto os elétrons podem reduzir oxigênio, formando espécies reativas associadas à ação antimicrobiana (Hoffmann et al., 1995; Kikuchi et al., 1997; Rokicka-Konieczna; Morawski, 2024).

A inativação microbiana é um processo interfacial em múltiplas etapas. As células precisam aproximar-se de regiões fotoativas; a geração de espécies oxidantes deve atingir fluxo suficiente; e o dano oxidativo deve superar os mecanismos de reparo e defesa celular. Estudos clássicos relacionam a perda de viabilidade à oxidação de lipídios e proteínas, comprometimento de membrana e perda de integridade celular (Gogniat et al., 2006; Carre et al., 2014). Por isso, a proximidade entre célula e fotocatalisador é determinante para a cinética observada.

Figura 1. Caminho mecanístico proposto para a ação antimicrobiana de superfícies cimentícias funcionalizadas com TiO_2 .



Fonte: elaboração própria.

2.2. Interações Entre TiO_2 e Matriz Cimentícia

Um aspecto recorrente é a diferença entre teor nominal e fração fotoativa efetivamente acessível. Partículas incorporadas em massa podem atuar como sítios de nucleação e alterar a hidratação, mas uma parcela significativa pode ficar embutida nos produtos hidratados e deixar de participar da fotocatalise superficial. Em consequência, revestimentos e estratégias de enriquecimento superficial podem apresentar maior eficiência funcional por unidade de massa de TiO_2 (Chen; Poon, 2009; Guo; Maury-Ramírez; Poon, 2015).

A aglomeração é outra limitação relevante. Nanopartículas de TiO_2 apresentam elevada energia superficial e, quando mal dispersas, formam aglomerados que reduzem a área específica efetiva e geram regiões heterogêneas. Procedimento de dispersão, sequência de mistura, uso de dispersantes e química do aditivo passam, portanto, a ser variáveis funcionais do material. Estudos recentes associam diretamente hidratação, dispersão e desempenho antibacteriano, demonstrando que a história de reação da matriz não pode ser separada do comportamento fotocatalítico da superfície (Liu et al., 2024).

A microestrutura influencia também a bioreceptividade. Rugosidade elevada e porosidade aberta oferecem nichos de proteção e retenção de água capazes de favorecer a colonização; por outro lado, matrizes muito densas podem reduzir a umidade disponível, mas também encapsular o fotocatalisador. O projeto ótimo precisa equilibrar durabilidade, bioreceptividade e acessibilidade fotocatalítica, e não simplesmente maximizar um único parâmetro.

2.3. Da Atividade Antibacteriana Ao Desempenho Antibiofilme

Os termos antibacteriano, antimicrobiano, antiadesivo e antibiofilme representam reivindicações biologicamente distintas. Atividade antibacteriana geralmente indica redução de viabilidade ou crescimento bacteriano; antiadesão representa redução da fixação inicial na superfície; e atividade antibiofilme, em sentido rigoroso, deve demonstrar prevenção do desenvolvimento, redução de comunidade séssil ou desestruturação de biofilme estabelecido. Assim, um material pode apresentar forte efeito sobre células planctônicas e ainda permitir que sobreviventes residuais se fixem e se recuperem em estado de biofilme (Perez; Lors; Erable, 2022).

Essa distinção é particularmente importante para fotocatalisadores imobilizados. Ensaio de halo de inibição são adequados para agentes solúveis que difundem no ágar, mas possuem baixo ajuste mecanístico para TiO_2 fixado em cimento, cuja ação depende da incidência luminosa, do contato superficial e da geração local de espécies reativas. Um halo pequeno ou ausente não comprova ausência de atividade fotocatalítica; de modo equivalente, um halo visível não comprova ação antibiofilme (Hegyi et al., 2021).

2.4. Dependência do Tipo de Microrganismo

Escherichia coli é um dos modelos mais empregados na literatura de desinfecção fotocatalítica e também aparece com frequência nos estudos cimentícios. Sua ampla utilização facilita comparações, mas representa apenas uma arquitetura celular. Bactérias Gram-negativas possuem membrana externa adicional, enquanto bactérias Gram-positivas apresentam espessa camada de peptidoglicano. A suscetibilidade, contudo, não depende apenas da classificação de Gram, pois composição de membrana, sistemas antioxidantes, agregação e estado fisiológico influenciam a resposta

ao estresse oxidativo (Matsunaga et al., 1988; Saito et al., 1992; Cho et al., 2004).

Fungos constituem um desafio distinto devido à presença de esporos, hifas, pigmentação e estruturas extracelulares. Compósitos cimentícios contendo nano-TiO₂ já foram avaliados contra *Aspergillus* e *Penicillium*, com efeitos inibitórios após fotoativação (Hegyi et al., 2021). Estudos de colonização fototrófica com *Chlorella vulgaris* também mostram que rugosidade, porosidade e retenção de água interagem com a atividade fotocatalítica e ajudam a aproximar o ensaio das condições ambientais reais (Maury-Ramírez et al., 2013).

2.5. Métodos de Avaliação Microbiológica

A caracterização adequada do desempenho antibiofilme exige combinação de métodos. Contagem de unidades formadoras de colônia fornece medida quantitativa de viabilidade; cristal violeta estima biomassa aderida; microscopia eletrônica permite visualizar morfologia e adesão; microscopia confocal pode fornecer espessura e biovolume; e técnicas moleculares permitem monitorar alvos específicos. Nenhum desses métodos, isoladamente, descreve toda a resposta biológica. Em superfícies cimentícias, controles de matriz são ainda necessários porque partículas de cimento, dispersão de luz pelo TiO₂ e coloração da superfície podem interferir em medidas ópticas (Perez; Lora; Erable, 2022).

Tabela 1. Comparação crítica dos principais métodos utilizados na avaliação antimicrobiana e antibiofilme.

Método	Endpoint principal	Vantagem	Limitação em cimento/TiO ₂	Uso recomenda
--------	--------------------	----------	---------------------------------------	---------------

				do
Halo de inibição	Supressão do crescimento ao redor do corpo de prova	Simples e econômico	Depende de agente difusível; pouco adequado ao TiO_2 imobilizado	Triagem preliminar
UFC	Células viáveis cultiváveis	Permite redução logarítmica	Recuperação de células sésseis pode ser incompleta	Endpoint quantitativo central
Turbidez/O D	Crescimento/ biomassa no meio	Rápido e escalável	Não distingue adequadamente células vivas e mortas; partículas interferem	Triagem planctônica
Cristal violeta	Biomassa aderida total	Útil para formação de biofilme	Marca biomassa viva e morta	Biofilme com controles
Live/Dead	Integridade de membrana	Informação espacial	Pode classificar incorretamente células lesionadas	Imagem complementar
MEV/FESEM	Morfologia e adesão superficial	Alta resolução	Não é quantitativo nem específico de viabilidade	Confirmação estrutural
CLSM	Estrutura 3D do biofilme	Espessura e biovolume	Exige instrumentação e marcação	Evidência antibiofilme robusta

qPCR	Abundância de DNA-alvo	Alta sensibilidade	DNA pode persistir após morte	Rastreamento de comunidade/alvo
------	------------------------	--------------------	-------------------------------	---------------------------------

Fonte: elaboração própria, com base em Perez, Lors e Erable (2022) e ISO 27447:2019.

A padronização internacional precisa ser interpretada com cautela. A ISO 22196:2011 é voltada à atividade antibacteriana em plásticos e outras superfícies não porosas e exclui materiais fotocatalíticos. A ISO 27447:2019 trata especificamente da atividade antibacteriana de materiais fotocatalíticos semicondutores sob radiação ultravioleta, mas restringe sua aplicabilidade a determinadas geometrias e exclui materiais porosos, granulares ou em pó. Como substratos cimentícios são porosos, reativos e opticamente heterogêneos, protocolos para superfícies não porosas não devem ser transplantados sem adaptação (ISO, 2011; ISO, 2019).

2.6. Condições de Luz e Dosimetria

Resultados fotocatalíticos antimicrobianos não são interpretáveis sem descrição adequada da luz. Comprimento de onda, irradiância na superfície do corpo de prova, tempo de exposição, dose radiante, distância da fonte e aumento de temperatura devem ser reportados. Além disso, cada composição contendo TiO_2 requer controle no escuro, e cada condição de iluminação deve incluir uma matriz sem TiO_2 . O anatase não modificado responde principalmente à radiação UV; a ativação eficiente por luz visível depende de defeitos, dopantes, heterojunções ou sensibilizadores (Hamdany; Ding; Qian, 2022; Hamdany; Ding; Qian, 2023).

2.7. Durabilidade, Envelhecimento e Retenção Funcional

A questão de engenharia mais relevante não é apenas se um corpo de prova novo inativa microrganismos, mas se a superfície preserva atividade ao longo da vida útil. Carbonatação modifica química e pH; abrasão pode remover revestimentos ou expor partículas embutidas; deposição atmosférica pode mascarar sítios ativos; ciclos de molhagem e secagem alteram fissuração e sais; e fouling orgânico compete pelas espécies reativas. A atividade pode, portanto, diminuir ou apresentar comportamento não monotônico com o tempo (Chen; Poon, 2009; Hamidi; Aslani, 2019).

3. METODOLOGIA

3.1. Estratégia de Revisão e Mapeamento de Evidências

O estudo foi conduzido como revisão crítica estruturada com mapeamento expandido de evidências, e não como metanálise quantitativa. O recorte foi definido na interseção entre fotocatalise com TiO_2 , materiais cimentícios, desempenho antimicrobiano de superfícies e comportamento de biofilmes. A data de corte da literatura foi 8 de agosto de 2026. Foram formuladas estratégias de busca para Scopus e Web of Science com três blocos conceituais: dióxido de titânio, matrizes cimentícias e desfechos microbiológicos. Busca mecanística complementar incluiu termos relacionados a hidratação, microestrutura, dispersão, coating, carbonatação, envelhecimento, weathering, fotocatalise e ativação por luz visível.

Foram retidos estudos experimentais primários com relevância para construção ou materiais cimentícios e desfecho interpretável, desde que sua identidade bibliográfica pudesse ser confirmada por DOI, página da editora ou registro indexador confiável. Revisões,

editoriais, cimentos biomédicos ou odontológicos, suspensões de TiO_2 sem conexão com substrato de construção e duplicatas foram excluídos do corpus primário. Como a heterogeneidade entre matriz, fonte luminosa, microrganismo e definição de desfecho impede agrupamento estatístico confiável, a síntese privilegiou consistência mecânica e comparabilidade dos métodos.

3.2. Estratificação dos Níveis de Evidência

O corpus expandido foi organizado em três níveis para evitar superestimação da evidência antibiofilme. O Nível A reúne 18 trabalhos com evidência microbiana, antibacteriana, antifúngica, antibiofilme ou antifouling direta em materiais cimentícios funcionalizados com TiO_2 ou superfícies de construção intimamente relacionadas. O Nível B reúne seis trabalhos de desenvolvimento de biofilmes e biodeterioração em matrizes cimentícias, utilizados para estabelecer realismo biológico e diferenças entre células planctônicas e comunidades sésseis. O Nível C reúne 50 trabalhos primários sobre TiO_2 -cimento voltados a hidratação, dispersão, atributos de partícula, arquitetura de revestimento, acessibilidade fotocatalítica, carbonatação, weathering, retenção funcional e engenharia para luz visível. Apenas o Nível A sustenta reivindicações diretas de eficácia antimicrobiana.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Mapa de Evidências Microbianas Diretas

A expansão bibliográfica resultou em 74 estudos primários mapeados. Apesar do volume de pesquisas sobre TiO_2 e cimento, apenas 18 se enquadraram no nível de evidência microbiana direta. Esse desbalanceamento constitui um achado central: a literatura de

fotocatálise em materiais cimentícios é muito mais ampla do que a literatura que efetivamente testa microrganismos, e ainda menor é o conjunto que avalia biofilmes maduros.

Tabela 2. Síntese dos estudos com evidência microbiana direta (Nível A).

Estudo	Sistema/Ti O ₂	Modelo microbiano	Ativação	Desfecho	Contribuição
Guo; Ling; Poon (2012)	Argamassa autoadensável; nano-TiO ₂ incorporado	E. coli K12	Fotocatalítica	Inativação bacteriana	Evidência direta inicial e argamassa

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: <https://revistatopicos.com.br/artigos/materiais-cimenticios-funcionalizados-com-nano-tio-para-controle-de-biofilmes-microbianos-mecanismos-desempenho-metodos-de-avaliacao-e-perspectivas-de-pesquisa?noblockage>

Fonte: elaboração própria a partir dos estudos incluídos no mapa de evidências.

4.2. Síntese Crítica dos Resultados

A evidência direta é mais robusta para inativação bacteriana fotocatalítica e antifouling superficial do que para erradicação de biofilmes maduros. *Escherichia coli* domina os modelos experimentais, embora também existam estudos com bactérias

Gram-positivas, fungos, microalgas e bioaerossóis. A recorrência de resultados em diferentes sistemas sustenta a viabilidade do conceito, mas não autoriza extrapolação automática entre organismos ou condições de serviço.

Um padrão material consistente é a importância da disponibilidade superficial do fotocatalisador. Guo, Maury-Ramírez e Poon (2015) observaram desempenho superior de revestimentos em comparação ao TiO_2 incorporado em massa, evidenciando que a quantidade total adicionada não representa a fração efetivamente ativa. De maneira complementar, Liu et al. (2024) demonstraram que hidratação e desempenho antibacteriano podem ser analisados de forma acoplada, reforçando o papel do estado da matriz na função fotocatalítica.

Outro resultado relevante é a ampliação do espectro de ativação. Sistemas modificados com grafeno ou dopagem vêm sendo empregados para operar sob luz visível, aspecto estratégico para aplicações internas onde a disponibilidade de UV-A é reduzida (Hamdany; Ding; Qian, 2022; Hamdany; Ding; Qian, 2023; Janus et al., 2019). Entretanto, esses materiais não devem ser tratados como equivalentes ao TiO_2 não modificado, pois a engenharia eletrônica do fotocatalisador altera o mecanismo e a faixa espectral de resposta.

A heterogeneidade experimental impede um efeito antimicrobiano global único. Comprimento de onda, irradiância, tempo de contato, idade do cimento, umidade, pH, rugosidade, concentração do inóculo, método de recuperação e endpoint microbiológico variam significativamente entre os estudos. Assim, a literatura sustenta a possibilidade de supressão microbiana por TiO_2 , mas não sustenta

equivalência entre triagem antibacteriana e desempenho antibiofilme.

4.3. Proposta de Fluxo Padronizado

A partir das lacunas identificadas, propõe-se um protocolo integrado por quatro dimensões: estado do material, estado da luz, estado microbiológico e estado de envelhecimento. A definição do material deve incluir tipo de cimento, relação água/aglomerante, adições minerais, origem e fase cristalina do TiO_2 , tamanho primário de partícula, dosagem, procedimento de dispersão, rota de incorporação, cura e geometria do corpo de prova. A caracterização superficial deve incluir, sempre que possível, microscopia, rugosidade, molhabilidade e indicador de porosidade ou acessibilidade superficial.

A etapa fotocatalítica deve reportar faixa espectral, comprimento de onda de pico, irradiância na superfície, tempo, dose radiante e temperatura. O desenho experimental deve incluir controles claro/escuro e matriz sem TiO_2 . Para reivindicações antibiofilme, recomenda-se quantificar células aderidas viáveis e pelo menos um endpoint independente de biofilme, como biomassa, espessura/biovolume, EPS ou cobertura superficial em alta resolução. A erradicação de biofilme maduro deve ser diferenciada da prevenção de sua formação.

Ensaio de envelhecimento e reexposição devem preceder qualquer conclusão sobre durabilidade ou autodesinfecção. Carbonatação, ciclos molha-seca, abrasão e fouling orgânico representam exposições prioritárias. A retenção funcional pode ser expressa como

preservação percentual ou logarítmica do efeito antimicrobiano em relação ao estado inicial.

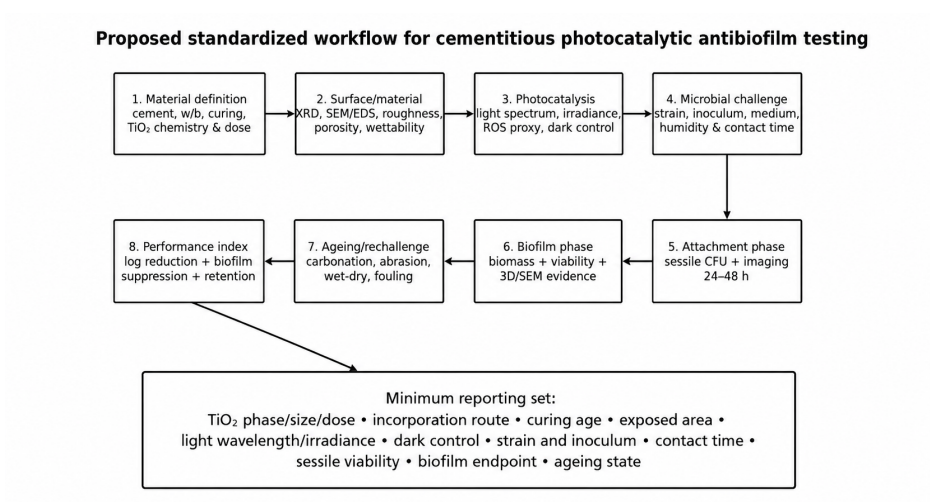


Figura 3. Fluxo padronizado proposto para avaliação de materiais cimentícios fotocatalíticos com finalidade antimicrobiana e antibiofilme. Fonte: elaboração própria.

4.4. Lacunas e Perspectivas de Pesquisa

A principal lacuna é a baixa proporção de estudos que utilizam biofilmes maduros e aderidos à superfície. A literatura ainda depende fortemente de ensaios planctônicos, que simplificam o sistema e não reproduzem a proteção conferida pela matriz extracelular. Estudos futuros devem aumentar a utilização de comunidades multiespécies, modelos bacteriano-fúngicos e consórcios ambientalmente representativos.

Também são necessárias métricas para TiO_2 superficialmente acessível, correlação entre essa fração e a cinética antimicrobiana, padronização da dosimetria, caracterização da carbonatação e do envelhecimento e avaliação simultânea de retenção/liberação de nanopartículas após abrasão e weathering. Protocolos específicos para fachadas, áreas úmidas, ambientes de saúde e infraestrutura de

águas residuárias devem substituir abordagens genéricas de laboratório quando o objetivo for aplicação prática.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Materiais cimentícios funcionalizados com TiO_2 constituem uma estratégia cientificamente plausível para controle microbiano por fotocatalise, mas a maturidade da evidência varia substancialmente entre reivindicações antibacterianas, antifúngicas, antifouling e antibiofilme. Os estudos disponíveis demonstram supressão de crescimento e inativação em diferentes modelos, porém poucos reproduzem a complexidade de biofilmes maduros aderidos a superfícies cimentícias.

O desempenho depende principalmente da fração fotoativa acessível na superfície, da dispersão e aglomeração do TiO_2 , da hidratação e microestrutura do cimento, do espectro e da dose de irradiação, da fisiologia microbiana, das condições de contato e do método de ensaio. Por isso, o teor nominal de TiO_2 , isoladamente, é um preditor insuficiente de eficácia antimicrobiana.

A revisão confirma que triagem por difusão, morte por contato e atividade antibiofilme representam níveis distintos de evidência. A adoção de quantificação de células sésseis, endpoints específicos de biofilme, dosimetria luminosa controlada e ensaios de envelhecimento/reexposição pode melhorar a comparabilidade e aproximar os estudos das condições reais do ambiente construído. O fluxo padronizado proposto fornece uma base para avançar de provas de conceito para materiais cimentícios antibiofilme mais reprodutíveis, duráveis e orientados à aplicação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BONETTA, S.; BONETTA, S.; MOTTA, F.; STRINI, A.; CARRARO, E. Photocatalytic bacterial inactivation by TiO₂-coated surfaces. *AMB Express*, v. 3, p. 59, 2013. DOI: 10.1186/2191-0855-3-59.

CARRE, G.; HAMON, E.; ENNAHAR, S. et al. TiO₂ photocatalysis damages lipids and proteins in *Escherichia coli*. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 80, p. 2573-2581, 2014. DOI: 10.1128/AEM.03995-13.

CHABERNY, I. F.; RÖSICK, U.; SOHR, D. et al. Disinfection of surfaces by photocatalytic oxidation with titanium dioxide and UVA light. *Chemosphere*, v. 53, p. 71-77, 2003. DOI: 10.1016/S0045-6535(03)00362-X.

CHEN, J.; POON, C. S. Photocatalytic cementitious materials: influence of the microstructure of cement paste on photocatalytic pollution degradation. *Environmental Science & Technology*, v. 43, p. 8948-8952, 2009. DOI: 10.1021/es902359s.

CHO, M.; CHUNG, H.; CHOI, W.; YOON, J. Linear correlation between inactivation of *E. coli* and OH radical concentration in TiO₂ photocatalytic disinfection. *Water Research*, v. 38, p. 1069-1077, 2004. DOI: 10.1016/j.watres.2003.10.029.

FUJISHIMA, A.; HONDA, K. Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode. *Nature*, v. 238, p. 37-38, 1972. DOI: 10.1038/238037a0.

GANJI, M. et al. Photocatalytic effect of nano-TiO₂ loaded cement on dye decolorization and *Escherichia coli* inactivation under UV irradiation. *Research on Chemical Intermediates*, v. 42, p. 5395-5412, 2016. DOI: 10.1007/s11164-015-2374-x.

GOGNIAT, G.; THYSSEN, M.; DENIS, M.; PULGARIN, C.; DUKAN, S. The bactericidal effect of TiO₂ photocatalysis involves adsorption onto catalyst and the loss of membrane integrity. FEMS Microbiology Letters, v. 258, p. 18-24, 2006. DOI: 10.1111/j.1574-6968.2006.00190.x.

GUO, M. Z.; LING, T. C.; POON, C. S. Nano-TiO₂-based architectural mortar for NO removal and bacteria inactivation. Cement and Concrete Composites, v. 36, p. 101-108, 2013. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2012.08.006.

GUO, M. Z.; LING, T. C.; POON, C. S. TiO₂-based self-compacting glass mortar: comparison of photocatalytic nitrogen oxide removal and bacteria inactivation. Building and Environment, v. 53, p. 1-6, 2012. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.12.022.

GUO, M. Z.; MAURY-RAMÍREZ, A.; POON, C. S. Versatile photocatalytic functions of self-compacting architectural glass mortars and their inter-relationship. Materials & Design, v. 88, p. 1260-1268, 2015. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.09.133.

HAMDANY, A. H.; DING, Y.; QIAN, S. Graphene-based TiO₂ cement composites to enhance the antibacterial effect of self-disinfecting surfaces. Catalysts, v. 13, p. 1313, 2023. DOI: 10.3390/catal13091313.

HAMDANY, A. H.; DING, Y.; QIAN, S. Visible light antibacterial potential of graphene-TiO₂ cementitious composites for self-sterilization surface. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 2022. DOI: 10.1080/21650373.2022.2143451.

HAMDANY, A. H.; SATYANAGA, A.; ZHANG, D.; KIM, Y.; KIM, J. R. Photocatalytic cementitious material for eco-efficient construction: a

systematic literature review. Applied Sciences, v. 12, p. 8741, 2022. DOI: 10.3390/app12178741.

HAMIDI, F.; ASLANI, F. TiO₂-based photocatalytic cementitious composites: materials, properties, influential parameters, and assessment techniques. Nanomaterials, v. 9, p. 1444, 2019. DOI: 10.3390/nano9101444.

HEGYI, A. et al. Influence of TiO₂ nanoparticles on the resistance of cementitious composite materials to the action of fungal species. Materials, v. 14, p. 4442, 2021. DOI: 10.3390/ma14164442.

HEGYI, A.; LĂZĂRESCU, A. V.; SZILAGYI, H.; GREBENIȘAN, E.; GOIA, J.; MIRCEA, A. Influence of TiO₂ nanoparticles on the resistance of cementitious composite materials to the action of bacteria. Materials, v. 14, p. 1074, 2021. DOI: 10.3390/ma14051074.

HOFFMANN, M. R.; MARTIN, S. T.; CHOI, W.; BAHNEMANN, D. W. Environmental applications of semiconductor photocatalysis. Chemical Reviews, v. 95, p. 69-96, 1995. DOI: 10.1021/cr00033a004.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 22196:2011: Measurement of antibacterial activity on plastics and other non-porous surfaces. Geneva: ISO, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 27447:2019: Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) — Test method for antibacterial activity of semiconducting photocatalytic materials. Geneva: ISO, 2019.

JANUS, M.; KUSIAK-NEJMAN, E.; ROKICKA-KONIECZNA, P.; MARKOWSKA-SZCZUPAK, A.; ZAJĄC, K.; MORAWSKI, A. W. Bacterial

inactivation on concrete plates loaded with modified TiO₂ photocatalysts under visible light irradiation. *Molecules*, v. 24, p. 3026, 2019. DOI: 10.3390/molecules24173026.

KIKUCHI, Y.; SUNADA, K.; IYODA, T.; HASHIMOTO, K.; FUJISHIMA, A. Photocatalytic bactericidal effect of TiO₂ thin films: dynamic view of the active oxygen species responsible for the effect. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, v. 106, p. 51-56, 1997.

LIU, Y.; GUO, H.; ZHU, Y.; ZHANG, Z. Hydration mechanism and photocatalytic antibacterial performance of cement-based composites modified by hydrophilic nano-TiO₂ particles. *Construction and Building Materials*, v. 419, p. 135538, 2024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135538.

LOH, K.; GAYLARDE, C.; SHIRAKAWA, M. A. Photocatalytic activity of ZnO and TiO₂ nanoparticles for use in cement mixes. *Construction and Building Materials*, v. 167, p. 853-859, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.103.

MATSUNAGA, T.; TOMODA, R.; NAKAJIMA, T.; NAKAMURA, N.; KOMINE, T. Continuous-sterilization system that uses photosemiconductor powders. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 54, p. 1330-1333, 1988. DOI: 10.1128/AEM.54.6.1330-1333.1988.

MAURY-RAMÍREZ, A.; DE MUYNCK, W.; STEVENS, R.; DEMEESTERE, K.; DE BELIE, N. Titanium dioxide based strategies to prevent algal fouling on cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, v. 36, p. 93-100, 2013. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2012.08.030.

PAGE, K.; WILSON, M.; PARKIN, I. P. Antimicrobial surfaces and their potential in reducing the role of the inanimate environment in the incidence of hospital-acquired infections. *Journal of Materials Chemistry*, v. 19, p. 3819-3831, 2009. DOI: 10.1039/B818698G.

PEREZ, C.; LORS, C.; ERABLE, B. Methodological approaches for the structural, chemical, and microbial analysis of microbial biofilms developed on the surface of cementitious materials: overview and future prospects. *International Biodeterioration & Biodegradation*, v. 175, p. 105485, 2022. DOI: 10.1016/j.ibiod.2022.105485.

ROKICKA-KONIECZNA, P.; MORAWSKI, A. W. Photocatalytic bacterial destruction and mineralization by TiO₂-based photocatalysts: a mini review. *Molecules*, v. 29, p. 2221, 2024. DOI: 10.3390/molecules29102221.

SAITO, T.; IWASE, T.; HORIE, J.; MORIOKA, T. Mode of photocatalytic bactericidal action of powdered semiconductor TiO₂ on mutants streptococci. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, v. 14, p. 369-379, 1992. DOI: 10.1016/1011-1344(92)85115-B.

SHEN, W.; ZHANG, C.; LI, Q.; ZHANG, W.; CAO, L.; YE, J. Preparation of titanium dioxide nano particle modified photocatalytic self-cleaning concrete. *Journal of Cleaner Production*, v. 87, p. 762-765, 2015. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.10.014.

SIKORA, P.; AUGUSTYNIAK, A.; CENDROWSKI, K. et al. Characterization of mechanical and bactericidal properties of cement mortars containing waste glass aggregate and nanomaterials. *Materials*, v. 9, p. 701, 2016. DOI: 10.3390/ma9080701.

SIKORA, P.; CENDROWSKI, K.; MARKOWSKA-SZCZUPAK, A.; HORSZCZARUK, E.; MIJOWSKA, E. The effects of silica/titania nanocomposite on the mechanical and bactericidal properties of cement mortars. *Construction and Building Materials*, v. 150, p. 738-746, 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.054.

UKRAINCZYK, N. et al. Interaction between wastewater microorganisms and geopolymer or cementitious materials: biofilm characterization and deterioration characteristics of mortars. *International Biodeterioration & Biodegradation*, v. 134, p. 58-67, 2018. DOI: 10.1016/j.ibiod.2018.08.005.

ÜNAL, S.; ORHAN, M.; CANBAZ, M. Sustainable antibacterial performance in cementitious systems using Ag-modified TiO₂ compounds. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, v. 19, p. 1061-1074, 2025. DOI: 10.1007/s11709-025-1187-2.

VERDIER, T.; COUTAND, M.; BERTRON, A.; ROQUES, C. Bacterial biofilm characterization and microscopic evaluation of the antibacterial properties of a photocatalytic coating protecting building material. *Coatings*, v. 8, p. 93, 2018. DOI: 10.3390/coatings8030093.

WATTS, R. J.; KONG, S.; ORR, M. P.; MILLER, G. C.; HENRY, B. E. Photocatalytic inactivation of coliform bacteria and viruses in secondary wastewater effluent. *Water Research*, v. 29, p. 95-100, 1995. DOI: 10.1016/0043-1354(94)E0122-M.

YADAV, H. M.; KIM, J. S.; PAWAR, S. H. Developments in photocatalytic antibacterial activity of nano TiO₂: a review. *Korean Journal of Chemical Engineering*, v. 33, p. 1989-1998, 2016. DOI: 10.1007/s11814-016-0118-2.

¹ Programa de Engenharia de Nanotecnologia (PENt), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Mestrando e pesquisador em materiais cimentícios funcionalizados, nanotecnologia aplicada à construção civil e controle microbiano de superfícies. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)