

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

ISABELA SANTOS OLIVEIRA

**ESTUDO SOBRE ARGAMASSAS AUTOLIMPANTES: INCORPORAÇÃO DE
DIÓXIDO DE TITÂNIO EM ARGAMASSA PARA FOTOCATÁLISE DE
CONTAMINANTES ORGÂNICOS E BACTÉRIAS EM LUZ VISÍVEL**

Ilha Solteira - SP
2024



ISABELA SANTOS OLIVEIRA

**ESTUDO SOBRE ARGAMASSAS AUTOLIMPANTES: INCORPORAÇÃO DE
DIÓXIDO DE TITÂNIO EM ARGAMASSA PARA FOTOCATÁLISE DE
CONTAMINANTES ORGÂNICOS E BACTÉRIAS EM LUZ VISÍVEL**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Universidade Estadual
Paulista (UNESP), Faculdade de
Engenharia, Ilha Solteira, para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marco Antônio de
Moraes Alcântara

Ilha Solteira - SP

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

O48e Oliveira, Isabela Santos.
Estudo sobre argamassas autolimpantes: incorporação de dióxido de titânio em argamassa para fotocatalise de contaminantes orgânicos e bactérias em luz visível / Isabela Santos Oliveira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
56 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira,
2024

Orientador: Marco Antônio de Moraes Alcântara

Inclui bibliografia

1. Argamassa autolimpante. 2. Patologias. 3. Fotocatalise. 4. Dióxido de titânio. 5. Degradação de poluentes. 6. Antimicrobiano.

FOLHA DE APROVAÇÃO


Aluno: ISABELA SANTOS OLIVEIRA

Título: "ESTUDO SOBRE ARGAMASSAS AUTOLIMPANTES: INCORPORAÇÃO DE DIÓXIDO DE TITÂNIO EM ARGAMASSA PARA FOTOCATÁLISE DE CONTAMINANTES ORGÂNICOS E BACTÉRIAS EM LUZ VISÍVEL"


Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenharia Civil, junto ao Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de Ilha Solteira

Aprovada em: 02/12/2024

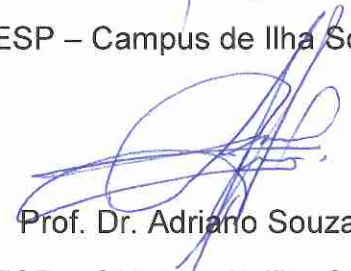
COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Marco Antônio de Moraes Alcantara
UNESP – Campus de Ilha Solteira (Orientador)



Prof. Dr. Artur Pantoja Marques
UNESP – Campus de Ilha Solteira



Prof. Dr. Adriano Souza
UNESP – Campus de Ilha Solteira

Ilha Solteira

02/12/2024

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Cícero e Maria, por todo amor e compreensão, sempre me apoiando nas minhas decisões. Graças a eles, sou capaz de buscar meus sonhos.

Ao meu irmão, Caio, por ser meu maior exemplo desde que era criança. Agradeço por todas as conversas e conselhos ao longo da minha jornada acadêmica, que muitas vezes foram meu apoio.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marco Antônio de Moraes Alcantara, agradeço pela orientação deste trabalho, por todo o direcionamento fornecido e conhecimentos transmitidos.

Aos meus amigos e colegas de graduação, por todo apoio ao longo desses anos, dentro e fora do campus.

Ao meu namorado, Guilherme, por sempre ser meu apoio e meu maior incentivador, estando sempre ao meu lado em todos os momentos.

RESUMO

A crescente preocupação com a poluição atmosférica e os danos estéticos e funcionais causados às fachadas de edifícios pela deposição de poeira, poluentes e microrganismos impulsionou o interesse pela aplicação de tecnologias fotocatalíticas na construção civil, conferindo características autolimpantes a concretos e argamassas. Entre as abordagens existentes, destaca-se o uso do dióxido de titânio (TiO_2), que pode ser aplicado em argamassas tanto como aditivo quanto como revestimento superficial por meio de tintas ou suspensões. O dióxido de titânio é amplamente estudado por seu baixo custo e alta eficiência; entretanto, sua ativação ocorre predominantemente sob radiação ultravioleta, limitando sua utilização. Para superar essa limitação, a dopagem com metais nobres como a prata tem sido explorada, promovendo a ativação do TiO_2 sob luz visível e aprimorando suas propriedades antimicrobianas. Estudos mostram que o método de revestimento com tintas contendo TiO_2 é mais eficiente na degradação de poluentes como óxidos de nitrogênio (NO_x), compostos orgânicos e microrganismos, devido à maior exposição de sítios ativos do fotocatalisador na superfície da argamassa. Por outro lado, a incorporação de TiO_2 como aditivo na matriz cimentícia apresenta limitações, como baixa acessibilidade das partículas às reações fotocatalíticas e impactos na trabalhabilidade e resistência mecânica da argamassa, embora o uso de aditivos plastificantes possa mitigar esses efeitos. Em termos de durabilidade, argamassas revestidas com tintas à base de TiO_2 demonstraram maior resistência a desgastes por intempéries em comparação à aplicação por suspensões, enquanto aquelas com TiO_2 incorporado como aditivo apresentaram aumento progressivo na eficiência fotocatalítica devido à exposição gradual das partículas pela abrasão superficial. Com base nos resultados revisados, conclui-se que as tintas à base de TiO_2 possuem maior potencial para aplicações em larga escala na construção civil, devido à combinação de eficiência fotocatalítica em luz visível e resistência ao desgaste. Este trabalho realiza uma revisão bibliográfica para avaliar diferentes métodos de aplicação do TiO_2 em argamassas e seus impactos na degradação de poluentes orgânicos, inorgânicos e microrganismos, discutindo ainda os efeitos do fotocatalisador nas propriedades físicas, químicas e mecânicas das argamassas.

Palavras-chave: argamassa autolimpante; patologias; fotocatalise; dióxido de titânio; degradação de poluentes; antimicrobiano.

ABSTRACT

The growing concern about air pollution and the aesthetic and functional damage caused to building facades by the deposition of dust, pollutants, and microorganisms has driven interest in the application of photocatalytic technologies in civil construction, granting self-cleaning properties to concrete and mortars. Among the existing approaches, the use of titanium dioxide (TiO₂) stands out, as it can be applied to mortars either as an additive or as a surface coating through paints or suspensions. Titanium dioxide is widely studied due to its low cost and high efficiency; however, its activation occurs predominantly under ultraviolet radiation, limiting its use. To overcome this limitation, doping with noble metals such as silver has been explored, enabling TiO₂ activation under visible light and enhancing its antimicrobial properties. Studies show that the coating method using TiO₂-based paints is more efficient in degrading pollutants such as nitrogen oxides (NO_x), organic compounds, and microorganisms, due to the greater exposure of the photocatalyst's active sites on the surface of the mortar. On the other hand, the incorporation of TiO₂ as an additive in the cementitious matrix presents limitations, such as low accessibility of particles to photocatalytic reactions and impacts on the mortar's workability and mechanical strength, although the use of plasticizing additives can mitigate these effects. In terms of durability, mortars coated with TiO₂-based paints demonstrated greater resistance to weathering compared to applications using suspensions, while those with TiO₂ incorporated as an additive showed a progressive increase in photocatalytic efficiency due to the gradual exposure of particles through surface abrasion. Based on the reviewed results, it is concluded that TiO₂-based paints have greater potential for large-scale applications in civil construction, due to the combination of photocatalytic efficiency under visible light and wear resistance. This work conducts a literature review to evaluate different methods of applying TiO₂ in mortars and their impacts on the degradation of organic and inorganic pollutants and microorganisms, further discussing the effects of the photocatalyst on the physical, chemical, and mechanical properties of mortars.

Keywords: self-cleaning mortar; pathologies; photocatalysis; titanium dioxide; pollutant degradation; antimicrobial.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases cristalográficas do TiO ₂ .	15
Figura 2 - Representação dos níveis de energia de um semicondutor e o processo fotocatalítico	18
Figura 3 - Ilustração esquemática da transferência eletrônica do dióxido de titânio para a prata.	19
Figura 4 - Túnel Umberto I, em Roma, Itália.	20
Figura 5 - Igreja Dio Padre Misericordioso, em Roma.	21
Figura 6 - Centro de pesquisas Italcementi, em Bérgamo, Itália	22
Figura 7 - Edifício corporativo Vodafone, em Milão, Itália	22
Figura 8 - Amostras de argamassa com incorporação de TiO ₂ .	25
Figura 9 - Taxa de degradação: A) Laranja de metila sob a luz UV, e B) Azul de metileno sob a luz solar	26
Figura 10 - Representação esquemática do sistema de reator de fluxo contínuo	29
Figura 11 - Percentuais de remoção de NO _x para incorporações de 10%, 25% e 50% de TiO ₂ em argamassas bicamada produzidas com areia, para 0% e 65% UR	30
Figura 12 - Percentuais de remoção de NO _x para incorporações de 10%, 25% e 50% de TiO ₂ em argamassas bicamada produzidas sem areia, para 0% e 65% UR	31
Figura 13 - Percentuais de remoção de NO _x para argamassas produzidas com TiO ₂ Aeroxide P25 e Kronos VLP 7000, para 0% e 65% UR	32
Figura 14 - Remoção fotocatalítica de NO _x de amostras de argamassa sob diferentes condições de irradiação	34
Figura 15 - Remoção fotocatalítica de xileno de amostras de argamassa sob diferentes condições de irradiação	35
Figura 16 - Degradação de Rhodamina B por argamassas fotocatalíticas em diferentes condições de iluminação	36
Figura 17 - Ilustração da morte bactéria através da fotocatalise e os mecanismos da atividade antimicrobiana desempenhada pelo TiO ₂ na bactéria E.coli	39
Figura 18 - Inativação fotocatalítica de E. coli K12 em argamassas na ausência e na presença de irradiação UVA	40

Figura 19 - Evolução das amostras com aplicação de TiO ₂ inoculadas com A. niger	42
Figura 20 -Evolução das amostras sem aplicação de TiO ₂ inoculadas com A. niger	42
Figura 21 - Colônias de Aspergillus niger A) em amostras sem TiO ₂ , e B) em amostras com TiO ₂	44
Figura 22 - Resistência a compressão de amostras produzidas com cimento cinza (G) e cimento branco (W), com incorporações de 0%, 5% e 10% de TiO ₂	47
Figura 23 - Aparato para simulação de condições climáticas	49
Figura 24 - Retirada de amostras da parede em via pública revestida com tinta à base de TiO ₂	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resistência a compressão das amostras controle, M2 e S2 aos 7 e 28 dias	46
Tabela 2 - Valores de degradação de Rhodamina-B das amostras de argamassa expostas a radiação UVA a cada ciclo de intemperismo.....	50
Tabela 3 - Resultados de degradação de NOx	51

SUMÁRIO

1	Introdução.....	12
2	Objetivos.....	14
2.1	Objetivo Geral.....	14
2.2	Objetivos Específicos.....	14
3	Revisão Bibliográfica	15
3.1	Processos oxidativos avançados (POA).....	15
3.2	Dióxido de titânio (TiO ₂).....	15
3.2.1	Fotocatálise	16
3.3	Argamassa.....	19
3.3.1	Argamassas autolimpantes.....	20
4	Metodologia	23
5	Discussão	24
5.1	Capacidade autolimpante	24
5.2	Propriedades antimicrobianas	38
5.3	Avaliação da durabilidade e das propriedades físicas e mecânicas em argamassas revestidas com TiO ₂	44
6	Considerações Finais	52
	REFERÊNCIAS.....	54

1 INTRODUÇÃO

O crescente aumento populacional trouxe consigo a necessidade de modificar e ampliar a produção industrial para atender as novas demandas da sociedade. Com a introdução da máquina a vapor durante a Revolução Industrial no século XVIII, houve um aumento significativo na poluição atmosférica, causada pela emissão de gases poluentes provenientes da queima de carvão mineral. A partir desse marco, a produção industrial passou por diversas transformações, mas, apesar das crescentes preocupações ambientais, a emissão de gases tóxicos e o descarte inadequado de resíduos industriais continuam sendo desafios globais.

Dentre os gases poluentes encontrados na atmosfera, destacam-se o dióxido de nitrogênio (NO_2), monóxido de carbono (CO) e o dióxido de enxofre (SO_2), por sua emissão estar presente em diversas atividades humanas, desde a produção industrial até a queima de combustível por automóveis (World Health Organization, 2021). A presença desses gases na atmosfera além de causarem prejuízo a saúde humana, ocasionam prejuízo estético atrelado a superfície de elementos urbanos (Lapidus et al., 2022), devido a deposição de partículas nas fachadas dos edifícios, acarretando manchas escuras.

Para mitigar a poluição do ar e seus efeitos, diversas estratégias e tecnologias vêm sendo desenvolvidas. Entre essas, os Processos Oxidativos Avançados (POA) se destacam por sua eficiência na degradação de micro poluentes e inativação de patógenos (Brito et al., 2019; Chen et al., 2022). A fotocatalise heterogênea, uma técnica POA promissora, envolve o uso de materiais fotocatalisadores, sendo o dióxido de titânio (TiO_2) o fotocatalisador mais estudado para este propósito, por ter baixo custo e alto potencial de degradação (Castro-Hoyos et al., 2022).

No contexto da construção civil sustentável, as fachadas de edifícios e outros elementos expostos em centros urbanos ficam constantemente em contato com agentes poluentes, tornando-se locais ideais para a aplicação de tecnologias fotocatalíticas. Essas superfícies podem ajudar tanto na redução dos índices de poluição do ar quanto na melhoria da estética urbana. O dióxido de titânio pode ser aplicado de duas maneiras nessas superfícies: pela incorporação do fotocatalisador na mistura de argamassa ou concreto ou por revestimentos superficiais, como tintas à base de TiO_2 ou pela aspersão de uma solução contendo o fotocatalisador (Bersch et al., 2023).

Embora o TiO_2 seja eficaz, suas reações fotocatalíticas possuem maior taxa de ativação quando as partículas do fotocatalisador são atingidas com radiação UVA. Um dos meios utilizados para contornar essa limitação é deposição de metais nobres como ouro, prata e platina na superfície do TiO_2 . Dentre esses, a prata mostrou ser eficiente na redução da taxa de recombinação dos pares elétron/buraco do fotocatalisador, além de ser capaz de melhorar as propriedades antimicrobianas (Wu et al., 2022).

Considerando o uso do fotocatalisador em locais sujeitos a desgaste por abrasão e ação climática, é essencial entender como as interações entre o TiO_2 e o substrato afetam as propriedades mecânicas e físicas do material. Este trabalho buscou realizar uma revisão bibliográfica para investigar os diferentes métodos de incorporação de TiO_2 em argamassas e a eficiência de cada um na degradação de poluentes e microrganismos, bem como avaliar questões de durabilidade de cada método, com o objetivo de identificar as soluções mais promissoras para a construção civil.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Explorar, por meio de pesquisa em publicações científicas, os diferentes métodos de incorporação de TiO_2 em argamassas, avaliando sua eficácia na degradação de contaminantes orgânicos, inorgânicos e microrganismos acumulados em superfícies de elementos construtivos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Analisar os impactos da incorporação de TiO_2 nas propriedades físicas, químicas e mecânicas das argamassas, considerando sua aplicação em larga escala na construção civil.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

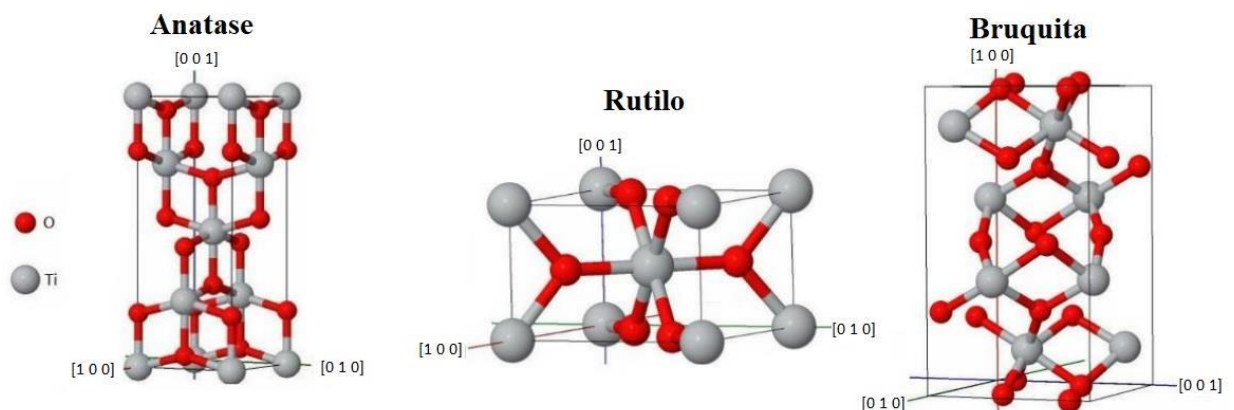
3.1 PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS (POA)

Processos Oxidativos Avançados (POA) compreendem uma gama de técnicas voltadas a degradação de poluentes. Em suma, os processos se baseiam na formação de espécies reativas de oxigênio (ERO), como os radicais hidroxila ($\text{OH}\bullet$), que são altamente reativos e não-seletivos, sendo capazes de desencadear processos de degradação de diversos compostos orgânicos, transformando-os em materiais inócuos como água e dióxido de carbono. O radical hidroxila possui potencial de oxidação igual a 2,80 V, geralmente, essa molécula é gerada através da combinação de agentes oxidantes com radiação ultravioleta (UV) ou visível (Vis) e catalisadores, como os semicondutores (Bezerra et al., 2022; Brito et al., 2019; Chen et al., 2021).

3.2 DIÓXIDO DE TITÂNIO (TiO_2)

O dióxido de titânio (TiO_2) é um óxido metálico semicondutor amplamente utilizado como fotocatalisador devido suas características autolimpantes, antibacteriana e de purificação do ar (Mocioiu et al., 2022), além de ser um material de baixo custo e toxicidade, estável química e termicamente (Pelaez et al., 2012). Este material possui três fases cristalógraficas, sendo duas delas com arranjo estrutural tetragonal (rutilo e anatase), e outra com arranjo ortorrômbico (bruquita), conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Fases cristalógraficas do TiO_2 .



Fonte: Adaptado de ANTON (2015)

A fase cristalográfica mais estável é o rutilo, entretanto, a fase que favorece o uso na maior parte das aplicações comerciais é a anatase (Reyes-Coronado et al., 2008; Takci, 2022). O rutilo normalmente é empregado em tintas e cosméticos, enquanto a anatase é comumente utilizada em células fotovoltaicas e como fotocatalisador em processos de degradação de moléculas orgânicas para a purificação da água (Bousiakou et al., 2022; Diebold, 2003). A bruquita é a fase cristalográfica menos estudada devido sua dificuldade de obtenção, o que não justifica sua aplicação em reações fotossintéticas ou na fotodegradação (Di Paola et al., 2013).

A anatase e a bruquita são metaestáveis e podem ser transformadas em rutilo através do processo de calcinação em temperaturas maiores que 600° C, entretanto, esse processo é irreversível. Deve-se atentar ao método de tratamento escolhido, já que durante esses processos, as características morfológicas do material também são afetadas (Pelaez et al., 2012; Takci, 2022).

Cada fase cristalográfica do TiO₂ possui um valor de energia de *bandgap*, e, por consequência, cada fase absorve energia em diferentes comprimentos de onda. A anatase apresenta *bandgap* de 3,2 eV e absorve no comprimento de onda de 387 nm, o rutilo possui *bandgap* de 3,0 eV e absorve no comprimento de onda de 413 nm e a bruquita, possui *bandgap* aproximado de 3,02 eV e absorve no comprimento de onda de 387 nm (Diebold, 2003). Quando a energia absorvida é igual ou maior a energia de *bandgap* do semicondutor, ocorre a excitação do elétron da banda de valência para a banda de condução, que pode desencadear a atividade fotocatalítica (Pelaez et al., 2012; Žerjav et al., 2019).

3.2.1 Fotocatálise

A fotocatalise pode ser descrita como o processo em que reações catalíticas são desencadeadas quando fótons incidem sobre um material, geralmente semicondutor (Ameta et al., 2018).

As reações fotocatalíticas podem ser classificadas como homogêneas ou heterogêneas. A fotocatalise homogênea ocorre quando o material catalisador e o reagente estão no mesmo estado físico, portanto, as reações ocorrem na superfície do catalisador. Na fotocatalise heterogênea, o catalisador e o reagente estão em fases distintas, nesse caso, as reações ocorrem por meio da interação dos radicais adsorvidos com o contaminante (Qahtan et al., 2023).

Observando as propriedades elétricas dos materiais sólidos, é possível classifica-los como isolantes, condutores ou semicondutores. O que os distingue é a diferença de energia existente entre a banda de valência e a banda de condução, chamada de *bandgap*. Essa propriedade influencia diretamente na capacidade de locomoção de elétrons de uma camada para outra: em materiais isolantes o *bandgap* é grande, o que dificulta locomoção dos elétrons, pois necessitam de uma enorme quantidade de energia para movimentar-se. Por outro lado, em materiais condutores, não há *bandgap*, ou seja, os níveis de energia são contínuos, permitindo a livre movimentação dos elétrons.

Em materiais semicondutores, a promoção de elétrons da banda de valência para a banda de condução ocorre quando a superfície deste material absorve fótons ($h\nu$) com energia igual ou superior ao seu *bandgap*, desencadeando uma reação fotocatalítica. A ocorrência dessa reação, forma uma vacância positiva na banda de valência, ocasionando pares elétrons (e^-)/buraco (h^+) (Ameta et al., 2018), conforme ilustrado na equação 1.



Após a foto ativação do TiO_2 , pode ocorrer a formação de radicais hidroxila através da reação de uma molécula adsorvida e um portador de carga (Equações 2 e 3). Os radicais oriundos dessa reação são capazes de degradar contaminantes orgânicos (Hanaor et al., 2010).



Outro mecanismo de degradação pode ocorrer através da interação com os elétrons foto gerados na superfície do semicondutor, gerando radicais derivados do oxigênio (Equações 4 e 5).

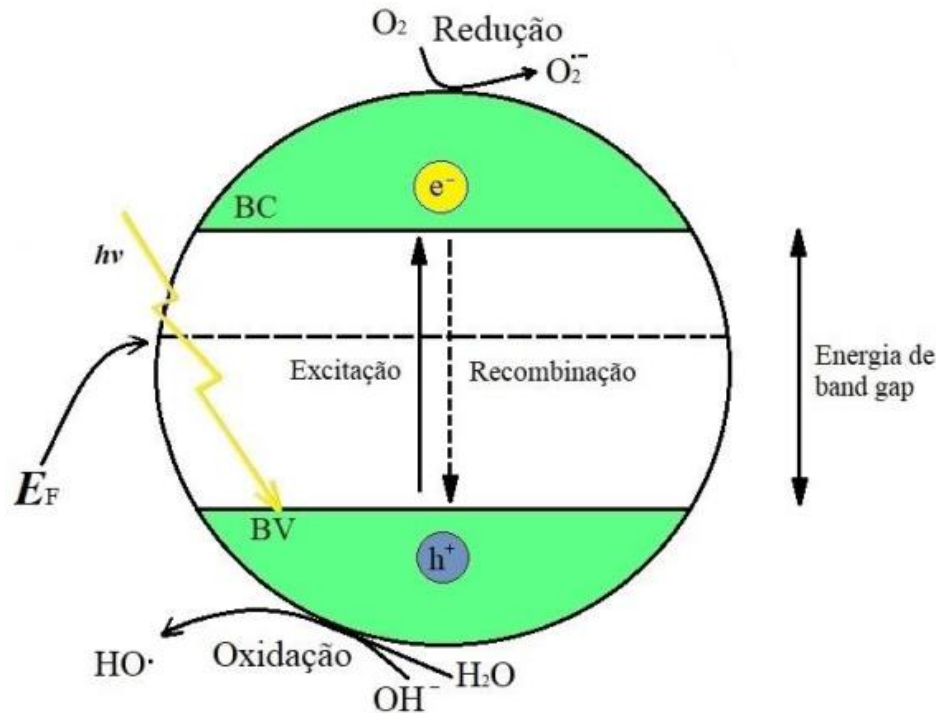


As reações descritas Equações 4 e 5 originam produtos que podem competir com as reações de oxidação dos poluentes, o que pode acarretar a diminuição da eficácia das reações fotocatalíticas.

A eficiência fotocatalítica está diretamente ligada ao tempo em que os portadores de carga permanecem disponíveis para que interajam com as moléculas adsorvidas. É importante evidenciar que após a formação do par elétron/buraco, existe

a possibilidade de ocorrer a recombinação dos pares, tornando-os indisponíveis para os processos de degradação, portanto, quanto menor a taxa de recombinação, maior a atividade fotocatalítica (Žerjav et al., 2019). A Figura 2 apresenta de forma visual o processo de fotocatalise.

Figura 2 - Representação dos níveis de energia de um semicondutor e o processo fotocatalítico



Fonte: Retirado de PADOVANI. (2018)

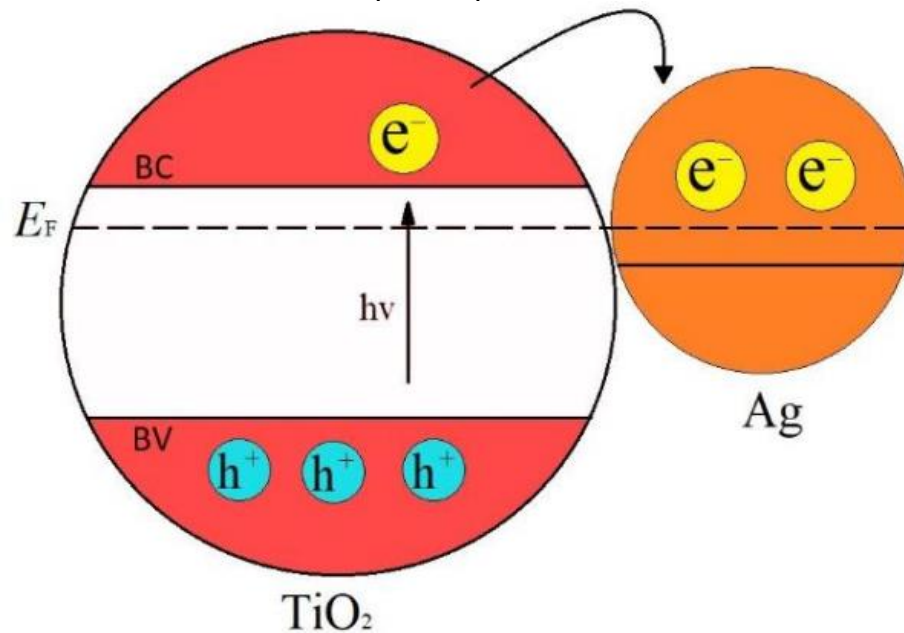
Dentre as três fases cristalográficas do TiO_2 , a anatase é mais utilizada nos processos fotocatalíticos por possuir maior área superficial, o que acarreta na maior adsorção de radicais hidroxila na superfície do semicondutor, e em uma taxa de recombinação menor em comparação a fase rutilo. Outra vantagem no uso da fase anatase, está em sua maior mobilidade eletrônica em comparação com as outras estruturas cristalográficas (Luttrell et al., 2014; Hanaor et al., 2010).

Afim de melhorar a eficiência fotocatalítica do dióxido de titânio, diminuindo sua taxa de recombinação, diversas técnicas foram exploradas, entre elas, a adição de metais nobres, como ouro, prata, platina e paládio no semicondutor, sendo que a adição de prata vem apresentando resultados promissores.

As partículas de prata adicionadas ao semicondutor agem capturando os elétrons da banda de condução do TiO_2 por meio de uma transferência eletrônica

interfacial, conforme indicado na Figura, diminuindo a quantidade de elétrons disponíveis, e por consequência, disponibilizando por mais tempo os buracos, que possuem maior potencial oxidativo (Pelaez et al., 2012).

Figura 3 - Ilustração esquemática da transferência eletrônica do dióxido de titânio para a prata.



Fonte: Retirado de PADOVANI. (2018)

3.3 ARGAMASSA

De acordo com a ABNT NBR 13281-1, a argamassa pode ser caracterizada como uma mistura homogênea de ligantes inorgânicos, agregados miúdos e água, podendo conter fibras, adições e/ou aditivos (ABNT, 2023). A argamassa é uma mistura versátil, podendo ser utilizada para o assentamento e fixação de alvenaria, revestimento de teto e paredes e assentamento de acabamentos decorativos, sendo que cada uso possui características próprias de desempenho.

As argamassas de revestimento podem ser divididas de acordo com o ambiente de aplicação da edificação: interno (paredes e tetos) ou externo (fachadas, muros e qualquer elemento em contato com o meio externo). A elaboração dessa argamassa pode ser feita em camadas, sendo elas: chapisco, que possui a finalidade de uniformizar a base e garantir a aderência do revestimento; emboço, responsável por regularizar a base (que pode ou não ser o chapisco); e o reboco, que receberá o acabamento decorativo (ABNT, 2013).

3.3.1 Argamassas autolimpantes

A crescente preocupação com os índices de poluição nos centros urbanos, acarretou no interesse científico por materiais construtivos capazes de auxiliar na redução dos níveis de poluição ambiental. Nesse sentido, a principal tecnologia estudada atualmente é a adição de materiais semicondutores em argamassas de revestimento, originando argamassas com propriedades autolimpantes.

Como apresentando ao decorrer do trabalho, o dióxido de titânio é o principal semicondutor utilizado em processos fotocatalíticos devido sua alta disponibilidade, porém, existem outros semicondutores explorados, como o óxido de zinco (ZnO) e óxido férrico (Fe_2O_3) (Balbuena et al., 2019). Os métodos mais comuns de incorporação de TiO_2 é por meio da aspersão superficial de uma solução aquosa com dióxido de titânio; e por meio da adição de dióxido de titânio na argamassa.

Os principais exemplos de aplicação de superfície argamassada com efeito fotocatalítico se encontram na Itália, onde a subsidiária da empresa Heidelberg Materials, a Italcementi, desenvolveu e patenteou cimento Portland com efeito fotocatalítico. Dentre os diversos empreendimentos em que o cimento fotocatalítico aplicado, pode-se destacar o projeto de renovação do túnel Umberto I, Figura 4, localizado em Roma, onde foi aplicado uma pintura a base de tinta cimentícia ao longo de toda sua extensão (Guerrini, 2011).

Figura 4 - Túnel Umberto I, em Roma, Itália.



Fonte: Retirado de Guerrini, (2011).

A primeira aplicação relatada em um edifício, foi na Igreja Dio Padre Misericordioso,

Figura 5, em Roma, projetada pelo arquiteto Richard Meier e inaugurada em 2002, a igreja utilizou um traço de concreto que visava a alta performance estrutural e a baixa manutenção do exterior, mantendo sua aparência estética inalterada ao longo do tempo. O centro de pesquisa do grupo Italcementi (Figura 6), localizado em Bérgamo, Itália, também projetado pelo arquiteto Richard Meier, é revestido com argamassa fotocatalítica, unindo aspectos arquitetônicos e sustentabilidade. O edifício corporativo da empresa Vodafone (Figura 7), em Milão, Itália, possui seu revestimento externo constituído com cimento branco fotocatalítico, o mesmo utilizado no centro de pesquisas do grupo Italcementi.

Figura 5 - Igreja Dio Padre Misericordioso, em Roma



Fonte: Heidelberg Materials. Imagem retirada de: <https://www.heidelbergmaterials.com/en/dio-padre-misericordioso>. Acesso em: 16 de abril de 2024

Figura 6 - Centro de pesquisas Italcementi, em Bérgho, Itália



Fonte: Heidelberg Materials. Imagem retirada de: <https://www.heidelbergmaterials.com/en/i-lab>. Acesso em: 16 de abril de 2024.

Figura 7 - Edifício corporativo Vodafone, em Milão, Itália



Fonte: Heidelberg Materials. Imagem retirada de: <https://www.heidelbergmaterials.com/en/vodafone-village>. Acesso em: 16 de abril de 2024.

4 METODOLOGIA

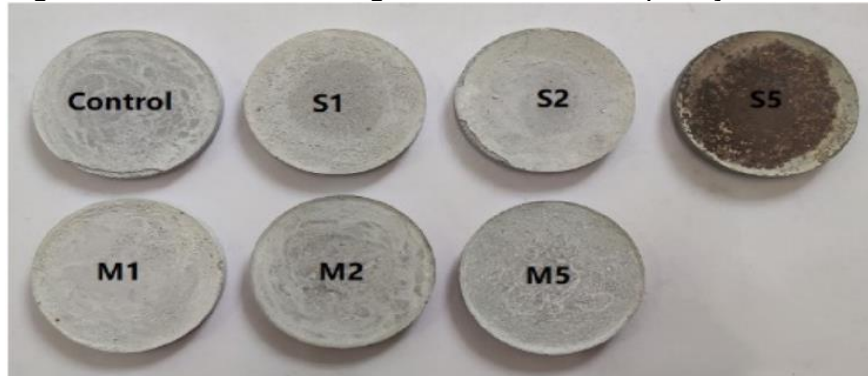
Para atingir o objetivo deste trabalho foi realizado um levantamento bibliográfico com o objetivo de explorar estudos importantes realizados na área e, a partir desses, obter dados e informações que auxiliaram no desenvolvimento do trabalho. Foram utilizados dados primários e secundários de fontes técnico-científicas como livros, teses e dissertações, normas nacionais e internacionais, manuais e revistas periódicas.

5 DISCUSSÃO

5.1 CAPACIDADE AUTOLIMPANTE

Dentre as formas de avaliação da capacidade de semicondutores de realizarem reações fotocatalíticas, observa-se que o método mais utilizado é o uso de corantes orgânicos como a Rhodamina B (RhB), o azul de metileno e a laranja de metila (Bersch et al., 2023). Para avaliar a capacidade de degradação de COVs (Compostos Orgânicos Voláteis) e NOx (óxidos de nitrogênio), são utilizados sistemas de reatores fotocatalíticos de fluxo contínuo, que permitem simular ambientes urbanos de forma controlada (Hernández-Rodríguez et al., 2019; Lapidus et al., 2022). Os óxidos de nitrogênio (NO₂ e NO - dióxido de nitrogênio e óxido nítrico, respectivamente), são compostos inorgânicos resultantes de processos de combustão que ocorrem em veículos automotivos e indústrias, por exemplo. Por serem gases poluentes comumente presentes na atmosfera devido a atividade humana, há uma crescente preocupação em encontrar meios de diminuir a concentração desses gases, por esse motivo, a capacidade de degradação desse poluente tornou-se um importante indicador de eficácia para fotocatalisadores.

Em sua pesquisa, Wu et al. (2022) sintetizaram o pó de Ag-TiO₂ utilizando uma solução de nitrato de prata e dióxido de titânio do tipo P25, produzindo o material final com três razões molares diferentes, sendo, respectivamente, 1%, 2% e 5%. Para estudar a forma mais eficiente de incorporação de Ag-TiO₂ em materiais argamassados, foram produzidos dois tipos diferentes de corpos de prova: a primeira categoria, denominada com a letra M, as diferentes concentrações sintetizadas de Ag-TiO₂ foram dosadas na argamassa como adição em relação a massa de cimento, sendo fixado o percentual de 5% de adição; na outra, foram preparadas soluções com o pó de Ag-TiO₂, todas com concentração de 20 g/L, e borrifadas na superfície das amostras no estado endurecido, denominadas com a letra S, conforme apresentadas na Figura 8.

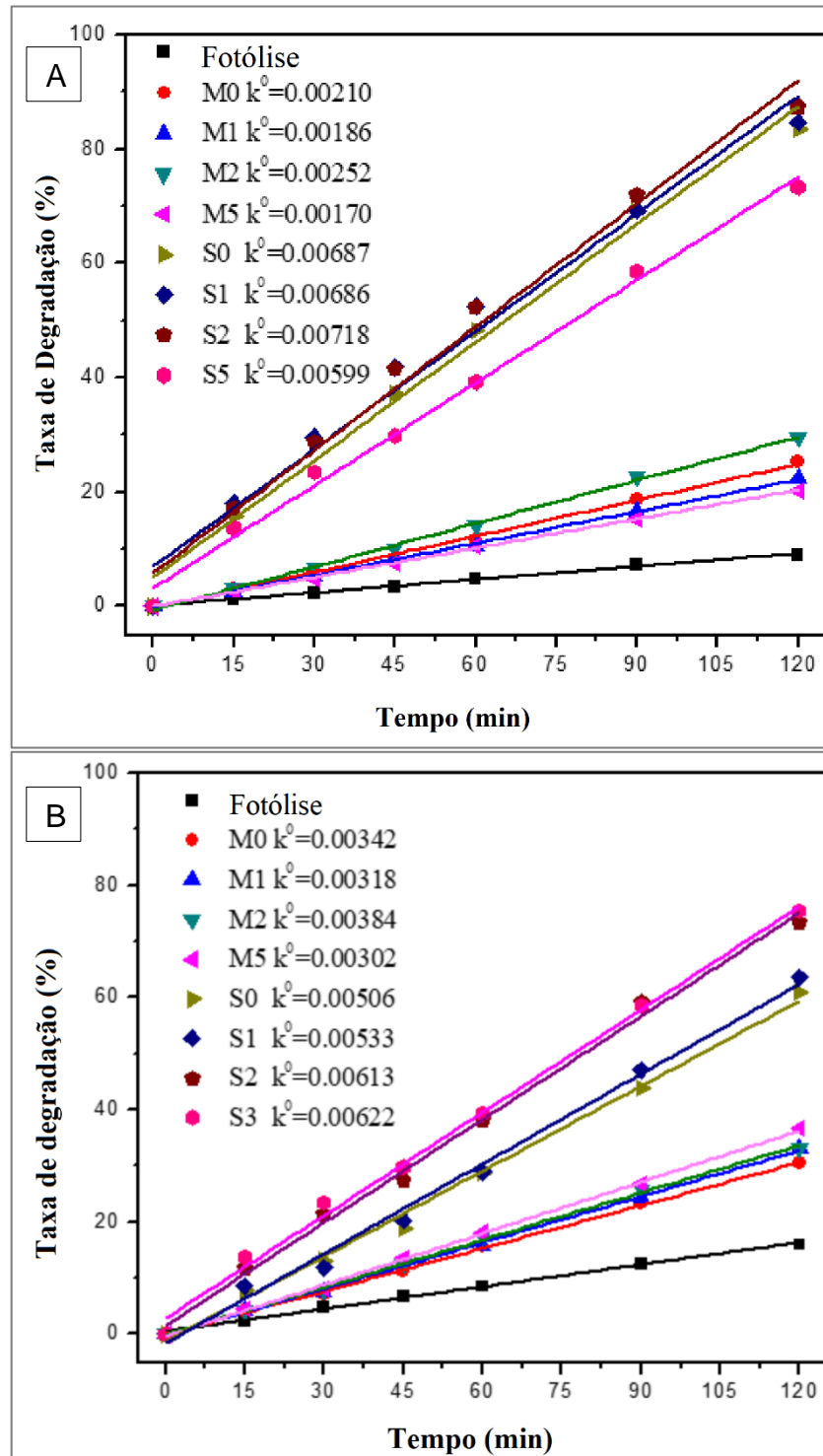
Figura 8 - Amostras de argamassa com incorporação de TiO₂

Fonte: Retirado de Wu et al. (2022)

Cada conjunto de amostras foi submetido a dois testes para verificar a capacidade de degradação de corantes, um sob luz UV e outro sob luz solar. Para o teste sob luz UV, foi utilizado uma lâmpada de mercúrio de 250 W de potência e uma solução de 400 ml de laranja de metila (concentração: 10 mg/L) na qual a amostra foi inserida. Para simular a luz solar, foi utilizado uma lâmpada de xênon de 300 W de potência e uma solução de 400 ml de azul de metileno (concentração: 10 mg/L).

Os resultados apresentados em seu trabalho apontam que, tanto sob a luz UV quanto sob a luz solar, as amostras que foram borrifadas com a solução de Ag-TiO₂ obtiveram taxas de degradação dos corantes maiores do que as amostras em que o pó de Ag-TiO₂ foi incorporado na massa. Tal resultado deve-se ao fato de que as reações fotocatalíticas ocorrem na superfície do corpo de prova, pois há o contato do Ag-TiO₂ com o poluente e com a luz. Nas amostras em que foi realizada a incorporação direta, a maior parte do conteúdo de Ag-TiO₂ está em seu interior, deixando de participar das reações fotocatalíticas. A Figura 9 apresenta os gráficos de degradação da laranja de metila e do azul de metileno, respectivamente, em função do tempo de exposição à iluminação, além dos valores das constantes de velocidade de reação para cada amostra.

Figura 9 - Taxa de degradação: A) Laranja de metila sob a luz UV, e B) Azul de metileno sob a luz solar



Fonte: Adaptado de Wu et al. (2022)

Outro aspecto observado está na melhora da atividade fotocatalítica conforme o aumento do conteúdo de prata, mostrando que as partículas de prata influenciaram o *bandgap* e o espectro do comprimento de onda que as amostras são capazes de

absorver energia, corroborando com o comportamento esperado da combinação de prata e dióxido de titânio.

Apesar dos resultados positivos em relação a capacidade autolimpante, alguns aspectos precisam ser avaliados cuidadosamente. Ao dosar a argamassa e utilizar o pó de prata-dióxido de titânio como um aditivo, a forma mais eficiente de evitar que sejam formados aglomerados do agente fotocatalisador na mistura, é utilizando parte da água de amassamento para realizar uma suspensão do pó de Ag-TiO₂, para então adicionar a mistura aos agregados. Além disso, o consumo do aditivo nesse método é elevado em comparação com outros métodos de incorporação, que possuem capacidade autolimpante similar ou maior (Castro-Hoyos et al., 2022). O segundo método utilizado por Wu et al. (2022) apresentou boa capacidade de degradação em ambos testes realizados, utilizando massa de Ag-TiO₂ 5 vezes menor do que o primeiro método, indicando que seria mais vantajoso sua utilização.

Enquanto o estudo de Wu et al. (2022) analisou a influência das moléculas de prata na capacidade fotocatalítica das argamassas ao variar as razões molares de Ag-TiO₂, mantendo constante o percentual de fotocatalisador incorporado, o trabalho realizado por Hernández-Rodríguez et al. (2019) focou na eficiência de remoção de óxidos de nitrogênio em argamassas fotocatalíticas, investigando o efeito do aumento progressivo do percentual de dióxido de titânio incorporado na mistura.

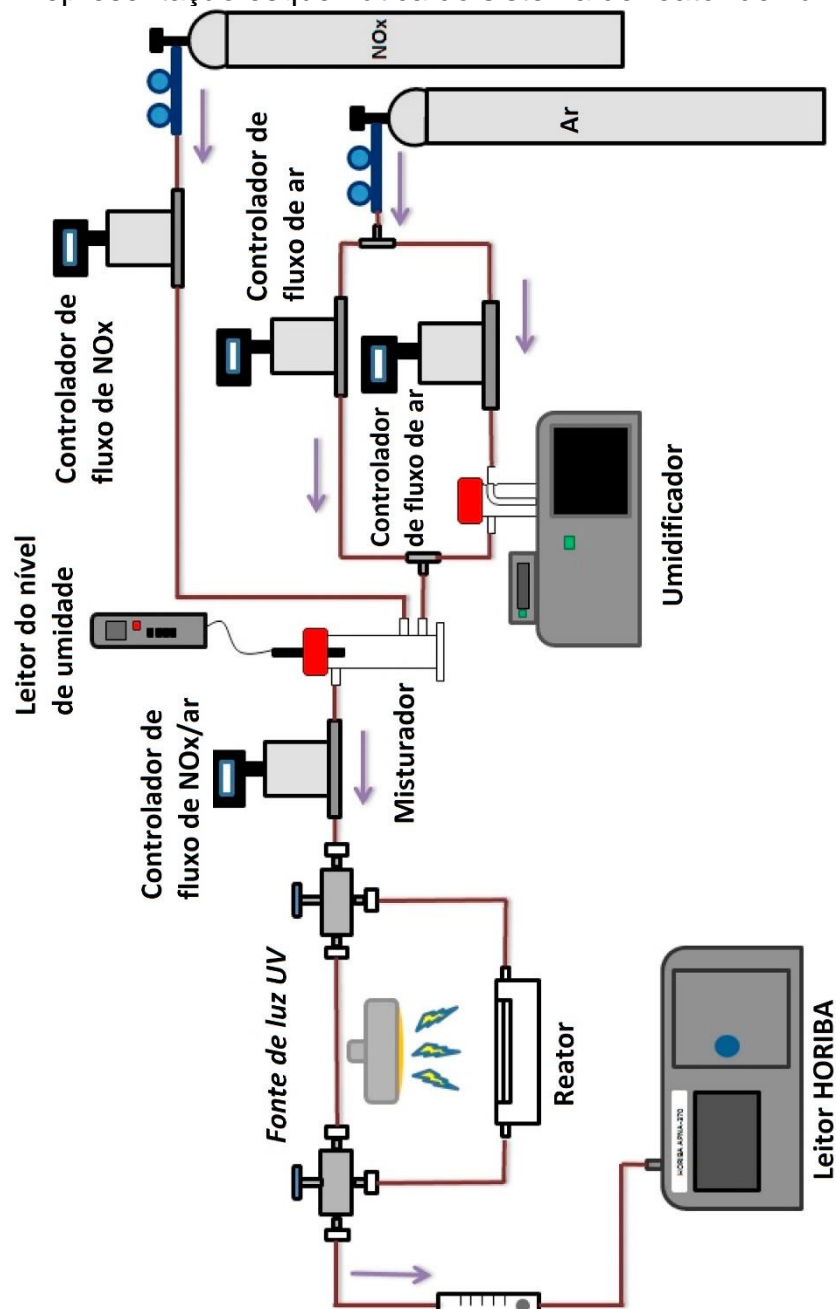
No estudo de Hernández-Rodríguez et al. (2019), foram avaliados dois métodos de incorporação de TiO₂. Em ambos os métodos, os corpos de prova possuem dimensões de 40 x 40 x 160 [mm]. O primeiro método de incorporação foi diretamente na mistura da argamassa, realizando adições de TiO₂ em proporções de 5% e 10% em relação a massa de cimento, sendo que um lote foi produzido com cimento cinza e outro com cimento branco. O segundo método consistiu em produzir corpos de prova com duas camadas: a primeira, feita com cimento cinza e sem fotocatalisador, ocupando 3 cm do molde; a segunda camada, produzida com cimento branco e com o fotocatalisador, ocupando o espaço restante do molde, resultando em uma camada de 1 cm de espessura. Nesse método, as incorporações de TiO₂ foram de 10%, 25% e 50% em relação a massa de cimento branco; além disso, a camada de cimento branco foi confeccionada com e sem areia para cada variação de fotocatalisador. O dióxido de titânio utilizado foi o Aeroxide TiO₂ P25 para os testes sob luz UV-Vis, e para os testes sob luz visível, foi utilizado o Kronos VLP 7000, ambos encontrados comercialmente.

A Figura 10 apresenta a configuração utilizada para realizar os testes fotocatalíticos. O reator onde o corpo de prova de argamassa foi inserido possui uma tampa hermética para evitar interferências externas. O fluxo de trabalho de entrada de ar total foi de 1,2 l/min, com pressão igual a 1 atm. A concentração de NO_x foi obtida pela diluição em ar de 100 ppm de monóxido de carbono, resultando em uma concentração de 500 ppb de NO. Também foi constatada a concentração de 20 ppb de dióxido de carbono. Os testes foram realizados sob duas condições de UR (umidade relativa do ar), 0% e 65%, a qual era controlada termostaticamente. Para os ensaios sob luz UV-Vis foi utilizada uma lâmpada de alta potência (300 W), e para os testes sob luz visível foi posicionado um filtro de vidro Schott, que bloqueia comprimentos de onda abaixo de 400 nm. Os níveis de NO_x foram medidos por um monitor de quimioluminescência.

Após 5 horas sob exposição de luz UV-Vis, em ambas condições de umidade relativa do ar, os corpos de prova produzidos em camada única, tanto com cimento cinza quanto com cimento branco, apresentaram atividade fotocatalítica relativamente baixa, sendo que os melhores resultados obtidos foram para as argamassas de cimento cinza e 10% de TiO₂, removendo cerca de 20% de NO_x para 0% e 65% UR. Os testes realizados com a presença de umidade no ar afetaram negativamente a performance das argamassas contendo dióxido de titânio, que apresentaram queda na capacidade de remoção de NO_x em comparação com o teste realizado sem umidade no ar. Os autores atribuem tal resultado a competição entre as moléculas de água e de NO_x por sítios ativos na superfície do fotocatalisador (Hernández-Rodríguez et al., 2019).

Apesar do método de incorporação de TiO₂ no volume total de argamassa ser de fácil execução, os resultados obtidos nos ensaios reforçam que a maior parte das moléculas do fotocatalisador não conseguem participar das reações de degradação por não estarem em contato com a radiação de luz e o poluente. Além disso, como os testes realizados com a presença de umidade no ar indicaram queda na performance, torna-se imprescindível utilizar métodos que garantam que a maior parte das moléculas do fotocatalisador participem das reações, para garantir que seja um método viável.

Figura 10 - Representação esquemática do sistema de reator de fluxo contínuo

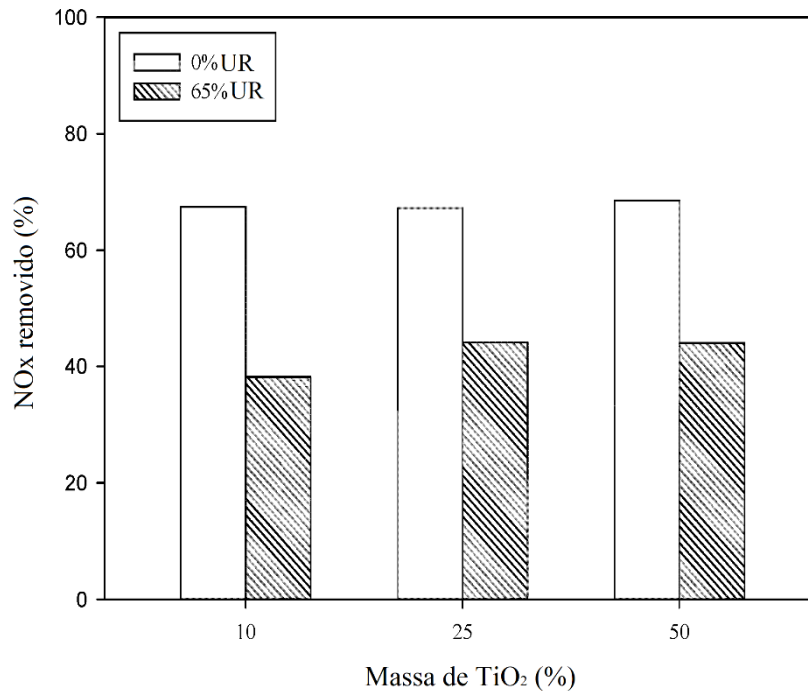


Fonte: Adaptado de HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ et al. (2016)

Nesse contexto, as argamassas confeccionadas em bicamada, com a incorporação de areia na camada de cimento branco, demonstraram resultados consistentes em testes sob condições de umidade, removendo aproximadamente 40% de NOx independentemente do percentual de TiO₂ utilizado. Ao utilizar menores quantidades de argamassa, houve melhora na dispersão das partículas de dióxido de titânio na superfície da argamassa, portanto, haviam mais sítios ativos para participar das reações de degradação. No entanto, quando a umidade foi removida do ambiente de teste, a remoção de poluentes aumentou significativamente, ultrapassando 60%

em todas as concentrações de TiO_2 . A Figura 11 apresenta os resultados obtidos para cada incorporação de dióxido de titânio.

Figura 11 - Percentuais de remoção de NO_x para incorporações de 10%, 25% e 50% de TiO_2 em argamassas bicamada produzidas com areia, para 0% e 65% UR

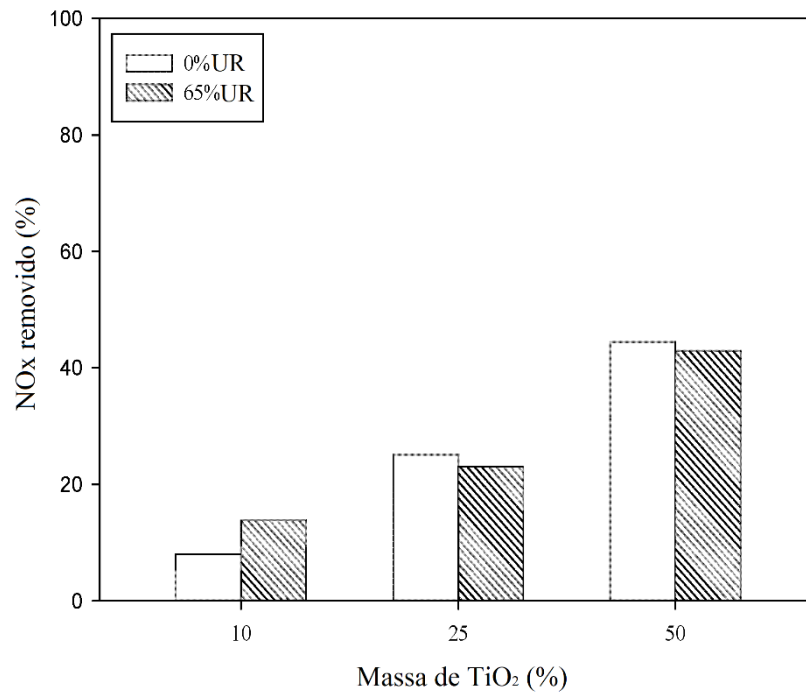


Fonte: Adaptado de Hernández-Rodríguez et al. (2019).

Legenda: UR: umidade relativa do ar.

As amostras produzidas sem areia na camada de cimento branco apresentaram queda significativa na performance para as incorporações de 10% e 25% de TiO_2 nas duas condições de umidade relativa do ar. A argamassa com incorporação de 50% de fotocatalisador obteve resultados semelhantes àquelas em que houve adição de areia na presença de umidade do ar. A areia, apesar de ser considerada um material inerte, contribui para a melhor dispersão do TiO_2 na argamassa, além de diminuir a interação do fotocatalisador com os produtos da hidratação do cimento, que podem se depositar sobre o TiO_2 , formando uma barreira que impede o contato da radiação e do poluente. A Figura 12 apresenta os resultados obtidos para cada incorporação de dióxido de titânio.

Figura 12 - Percentuais de remoção de NO_x para incorporações de 10%, 25% e 50% de TiO₂ em argamassas bicamada produzidas sem areia, para 0% e 65% UR

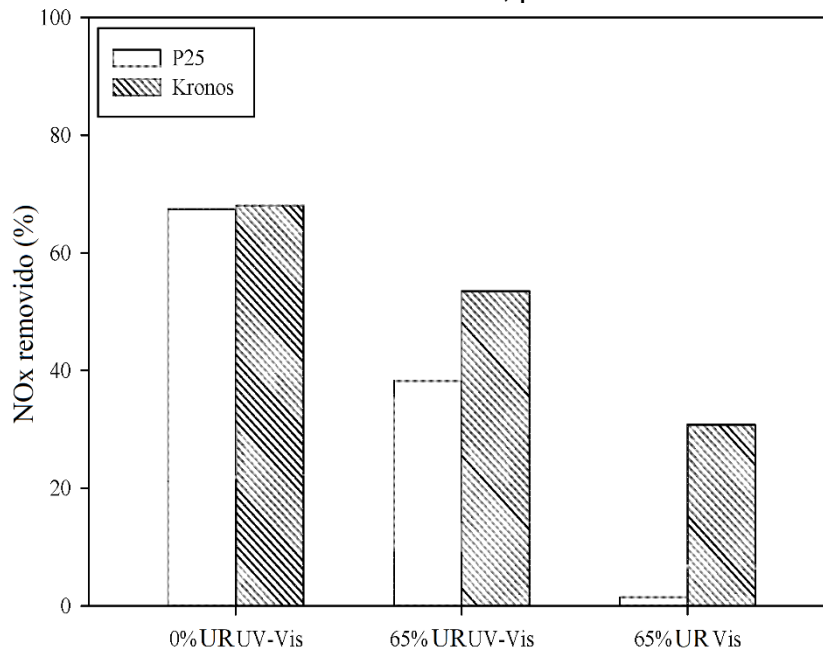


Fonte: Adaptado de Hernández-Rodríguez et al. (2019).

Legenda: UR: umidade relativa do ar.

O teste realizado com radiação visível procurou comparar a performance de dois dióxidos de titânio encontrados comercialmente, o Aeroxide P25 e o Kronos VLP 7000. Observa-se pela Figura 13, que o TiO₂ P25, o qual foi utilizado em todos os testes realizados pelos autores, apresenta baixíssima capacidade de remoção de NO_x sob a luz visível, enquanto o TiO₂ Kronos foi capaz de remover em torno de 30% do poluente.

Figura 13 - Percentuais de remoção de NOx para argamassas produzidas com TiO₂ Aeroxide P25 e Kronos VLP 7000, para 0% e 65% UR



Fonte: Adaptado de Hernández-Rodríguez et al. (2019).

Legenda: UR: umidade relativa do ar.

Com base no que foi discutido, a produção de argamassas em bicamada realmente aprimora a eficiência fotocatalítica, além de reduzir o consumo de TiO₂, já que este é incorporado apenas na camada superficial, que possui uma espessura menor. No entanto, a granulometria dos materiais combinados ao TiO₂ pode exigir ajustes no fator água/cimento e/ou a adição de plastificantes para garantir a trabalhabilidade da argamassa. Além disso, é essencial considerar o uso de areia ou outro agregado fino inerte para promover uma dispersão adequada do TiO₂ na matriz cimentícia (Hernández-Rodríguez et al., 2019). Por fim, considerando que apenas cerca de 5% da radiação solar corresponde ao UV, é crucial analisar as condições do local de aplicação da argamassa, incluindo umidade do ar e exposição à radiação, para selecionar o fotocatalisador mais adequado. Pode ser necessário optar por fotocatalisadores dopados com outros materiais para ajustar o *bandgap* e garantir a ativação sob os comprimentos de onda disponíveis no ambiente (Lapidus et al., 2022).

Outra aplicação de dióxido de titânio que apresenta bons resultados é por meio de tintas contendo TiO₂. Guo et al. (2015) estudaram a capacidade fotocatalítica de uma tinta à base de TiO₂ aplicadas a uma argamassa arquitetônica autoadensável com vidro reciclado em diversas situações.

A proposta de argamassas arquitetônicas autoadensáveis com vidro reciclado visa promover sustentabilidade e eficiência, ao combinar a tecnologia de auto adensamento com uso de agregados reciclados, como os fragmentos de vidro (Ulas et al., 2024). No trabalho de Guo et al. (2015), o vidro proveniente de garrafas de bebidas substitui a areia como agregado fino. A substituição da areia por vidro para a produção de argamassas autolimpantes permite que a luz chegue as partículas do fotocatalisador, o que pode potencializar as reações fotocatalíticas.

A composição da argamassa incluiu cimento branco, metacaulim, fragmentos de vidro reciclado, água e superplastificante, nas proporções de 0,8:0,2:2,0:0,4 (cimento: metacaulim: vidro reciclado: água). O metacaulim foi utilizado para mitigar as reações álcali-sílica, que poderiam ocorrer entre a sílica amorfa dos fragmentos de vidro e os álcalis presentes no cimento. A tinta aplicada na superfície das amostras continha 10% de TiO_2 em massa, com área superficial específica de $300 \text{ m}^2/\text{g}$. Sua aplicação foi realizada em três camadas cruzadas. Além das amostras revestidas com a tinta, foram preparadas amostras de argamassa contendo 5% de TiO_2 (P25, Degussa – área superficial: $50 \text{ m}^2/\text{g}$) em relação à massa de aglomerantes na mistura, visando comparar a atividade fotocatalítica de cada método.

Os testes realizados por Guo et al. (2015) analisaram a capacidade de degradação de óxidos de nitrogênio (NO_x) e o xileno, também conhecido como xilol, que é um hidrocarboneto aromático formado por um anel de benzeno e dois radicais metil, possuindo três isômeros. Também foi realizado o teste capacidade de degradação de corante orgânico, utilizando a Rhodamina B.

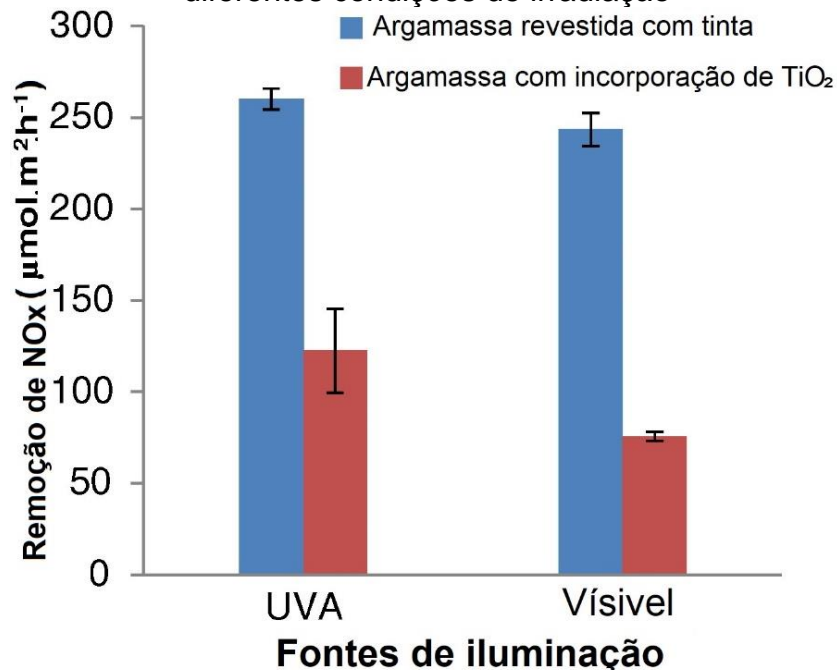
A degradação de NO_x e xileno foi realizada por um reator de remoção de gases poluentes, equipado com um conjunto de lâmpadas de luz negra, com emissão de raios UVA, com comprimento de onda entre 340 nm e 410 nm; uma lâmpada de halogênio, com emissão de raios no espectro visível, com comprimento de onda entre 100 nm e 700 nm. A concentração de NO_x no sistema foi medida por meio de um medidor quimioluminescente, enquanto o xileno foi medido por um detector de gás volátil. A taxa de fluxo de entrada de ar foi definida em 3 l/min, com concentração de NO_x igual a 1000 ppb e de xileno igual a 200 ppb.

A remoção de NO_x sob ambas as condições de iluminação - visível e UVA - foi mais eficaz nas amostras revestidas com a tinta contendo TiO_2 , em comparação às amostras com dióxido de titânio incorporado na mistura da argamassa, conforme observa-se na Figura 14. Essa superioridade do método de revestimento está ligada

ao tamanho das partículas de TiO_2 presentes na tinta, que possui uma área superficial específica de $300 \text{ m}^2/\text{g}$. Uma maior área superficial específica implica uma maior quantidade de sítios ativos disponíveis para as reações fotocatalíticas, o que aumenta a eficiência na degradação de poluentes como NO_x .

Por outro lado, o método de incorporação de TiO_2 na mistura da argamassa, analisado por Guo et al. (2015) apresenta uma limitação inerente: o controle limitado sobre a localização das partículas na superfície do substrato. Além disso, o TiO_2 utilizado na argamassa tem uma área superficial específica seis vezes menor do que o presente na tinta, o que resulta em menos sítios ativos acessíveis, reduzindo, portanto, a eficiência das reações fotocatalíticas em comparação com o revestimento superficial.

Figura 14 - Remoção fotocatalítica de NO_x de amostras de argamassa sob diferentes condições de irradiação



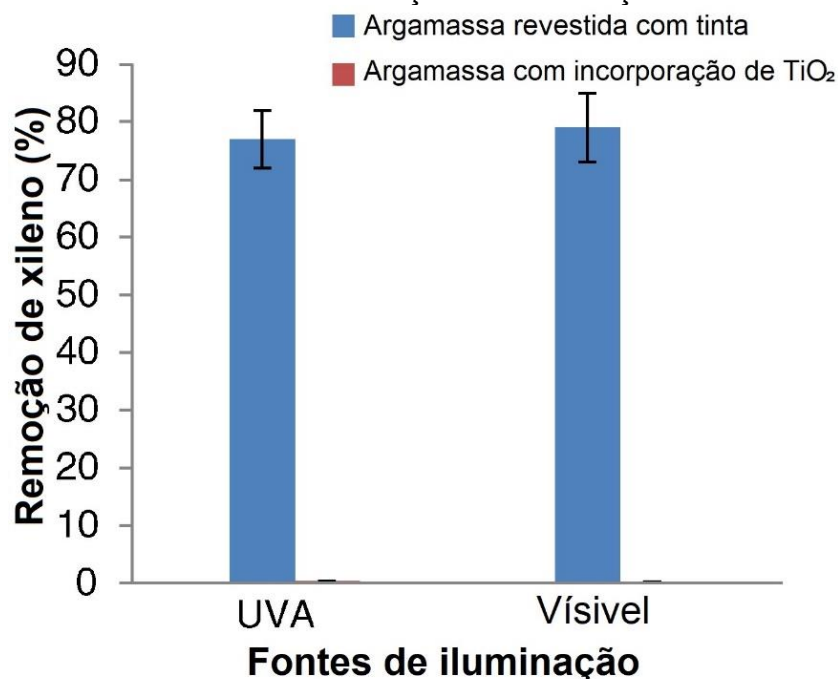
Fonte: Adaptado de Guo et al. (2015)

Em comparação aos óxidos de nitrogênio (NO_x), compostos orgânicos voláteis como o xileno apresentam maior dificuldade de degradação devido à sua alta estabilidade química. Isso exige uma maior eficiência fotocatalítica para alcançar a sua decomposição. Conforme ilustrado na Figura 15, as amostras revestidas com tinta contendo TiO_2 foram capazes de degradar cerca de 80% do xileno,

independentemente das condições de iluminação (visível ou UVA), o que demonstra a viabilidade deste método tanto em ambientes internos quanto externos.

Por outro lado, as amostras que tiveram o TiO_2 incorporado diretamente na mistura da argamassa não apresentaram uma degradação significativa, com valores próximos de 0%. Esses resultados reforçam a importância de garantir que a maior quantidade possível de sítios ativos do fotocatalisador esteja presente na superfície da argamassa, maximizando a exposição à luz e, conseqüentemente, melhorando o desempenho fotocatalítico na degradação de poluentes.

Figura 15 - Remoção fotocatalítica de xileno de amostras de argamassa sob diferentes condições de irradiação



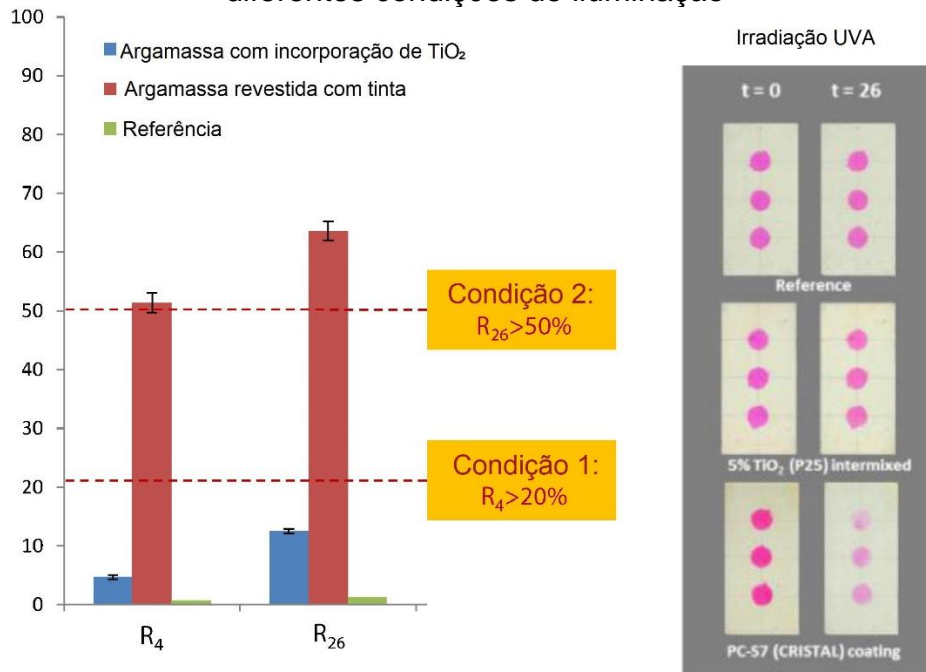
Fonte: Adaptado de Guo et al. (2015)

A fotocatalise da Rhodamina B foi realizada utilizando uma solução do corante com concentração de $5 \cdot 10^{-4}$ g/ml, aplicando-se 0,1 ml dessa solução em três posições pré-definidas em todas as amostras. As amostras foram, então, expostas a lâmpadas UVA, e a atividade fotocatalítica foi monitorada por meio de um espectrofotômetro portátil. As medições foram realizadas imediatamente antes de ligar as lâmpadas e após 4 horas e 26 horas de exposição à radiação UVA, de acordo com as diretrizes estabelecidas pela norma italiana para avaliação da atividade fotocatalítica de ligantes

hidráulicos. Segundo a norma, a remoção do poluente deve ser superior a 20% após 4 horas e maior que 50% após 26 horas de exposição (Guo et al., 2015).

Os resultados mostrados na Figura 16 indicaram que as amostras incorporadas com TiO_2 na mistura atingiram valores de remoção abaixo dos limites estabelecidos pela norma. Esse desempenho está em consonância com os resultados da degradação do xileno, reforçando a dificuldade em degradar compostos orgânicos quando a quantidade de partículas fotocatalíticas disponíveis na superfície da amostra é limitada.

Figura 16 - Degradação de Rhodamina B por argamassas fotocatalíticas em diferentes condições de iluminação



Fonte: Adaptado de Guo et al. (2015)

O uso de dióxido de titânio para conferir propriedades autolimpantes às argamassas pode gerar resultados eficazes, contribuindo tanto para a preservação de fachadas quanto para a redução de gases poluentes na atmosfera e a manutenção de ambientes internos mais limpos. Contudo, para alcançar esses benefícios, é essencial considerar as condições climáticas e o nível de exposição à irradiação no local de aplicação, garantindo a escolha do método mais eficiente.

O estudo de Guo et al. (2015) mostrou que, embora a incorporação de TiO_2 em pó com baixa área superficial específica na mistura de argamassa seja eficaz na degradação de óxidos de nitrogênio (NO_x), o método demonstrou menor eficiência na

degradação de compostos orgânicos mais complexos, como o xileno. Esse resultado ressalta a vantagem do uso de revestimentos à base de tintas contendo TiO_2 que possuam maior área superficial específica e, portanto, são capazes de oferecer uma maior quantidade de sítios ativos para as reações fotocatalíticas, tornando esse método mais interessante para aplicações que visam a remoção de uma gama mais ampla de poluentes.

Uma aplicação real de tinta à base de TiO_2 que apresentou bons resultados ocorreu na cidade de Roma, na reforma de um túnel localizado no centro da cidade, financiado pela empresa Italcementi. O túnel “Umberto I” está localizado próximo a pontos turísticos famosos, como a *Fontana di Trevi*, recebendo a passagem de uma grande quantidade de ônibus de turistas, taxis e transporte privado de passageiros, além do transporte público local (Guerrini, 2011).

Durante a reforma do túnel “Umberto I” em Roma, Itália, foi escolhida a tecnologia de tintas à base de TiO_2 para reduzir os níveis de poluição interna, melhorando a qualidade do ar para os pedestres que atravessam o túnel. Além disso, sistemas de iluminação em túneis geralmente combinam lâmpadas e superfícies de cores claras para maximizar a reflexão da luz. No entanto, com o constante tráfego de veículos, as paredes tendem a acumular poeira e poluentes, o que reduz significativamente essa reflexão. Assim, o uso de uma tecnologia autolimpante garante que as paredes permaneçam limpas por mais tempo, evitando a necessidade de manutenções frequente.

Foram utilizados duas colorações de tinta no túnel: até 1,80 m de altura foi utilizado a tinta de coloração cinza, e nos 6,70 m de altura restantes, foi utilizado uma tinta branca, ambas com propriedades fotocatalíticas. O sistema de iluminação do túnel foi projetado para maximizar o efeito fotocatalítico considerando a geometria do túnel, o grau de degradação de poluentes almejado e o gerenciamento de custos com energia elétrica, sendo assim adotado um sistema misto, com lâmpadas UVA e que simulam radiação visível. A análise da eficiência fotocatalítica observou a degradação dos níveis de NO_x utilizando reatores localizados ao longo de toda a extensão do túnel, sendo que foram realizadas duas campanhas de coleta de dados, uma em julho/2007, antes da reforma, e outra entre os meses de setembro e outubro/2007, após a reforma. Os níveis de NO_x obtidos dentro do túnel foram comparados aos níveis obtidos por três estações de monitoramento de níveis de poluição localizadas próximo ao túnel.

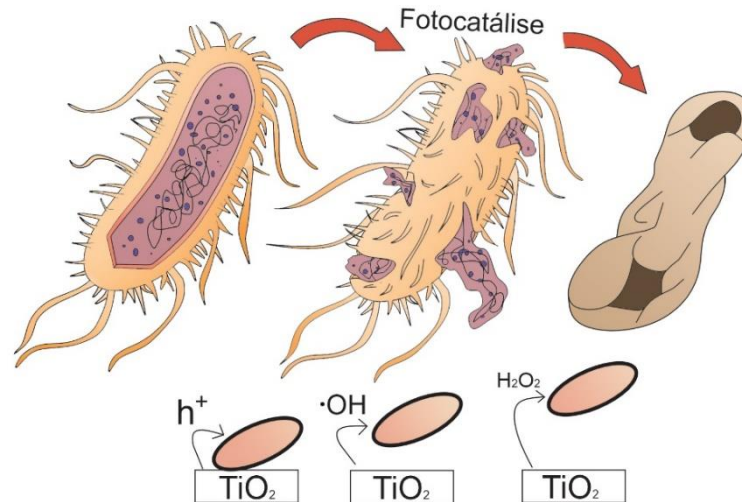
Os resultados obtidos apontam uma redução de cerca de 20% dos níveis de NO_x dentro do túnel após a reforma, enquanto as estações de monitoramento localizadas fora do túnel apontaram para um aumento nos níveis de NO_x no mesmo período. A estação mais próxima ao túnel, *Largo Arenula*, registrou um aumento de 121% nos níveis de NO_x em relação à primeira campanha de avaliação. Guerrini (2011) ainda sugere que os valores de degradação de poluentes dentro do túnel podem ser ainda maiores, uma vez que a normalização dos valores decorrente do tratamento estatístico dos dados ocasionou na redução dos resultados finais.

5.2 PROPRIEDADES ANTIMICROBIANAS

A rugosidade e porosidade de materiais cimentícios, em condições climáticas favoráveis, cria um ambiente propício para o crescimento de algas, fungos e bactérias. Dentre as formas de inibir o crescimento de microrganismos, tem-se a incorporação de fotocatalisadores como o TiO₂ (Castro-Hoyos et al., 2022).

O uso de luz ultravioleta configura a condição mais comum no estudo da atividade bactericida de argamassas com incorporação de dióxido de titânio. Microrganismos, como fungos e bactérias, possuem membranas celulares e estruturas orgânicas internas que tendem ser bastante resistentes, exigindo alta atividade fotocatalítica para que a membrana celular seja destruída pelos radicais gerados no processo de fotocatalise, e que os radicais estejam disponíveis por tempo suficiente de forma a permear nas estruturas internas até causar a morte celular do microrganismo. A Figura 17 ilustra o processo de degradação por meio da atividade fotocatalítica do TiO₂ da bactéria *Escherichia Coli*.

Figura 17 - Ilustração da morte bactéria através da fotocatalise e os mecanismos da atividade antimicrobiana desempenhada pelo TiO_2 na bactéria *E.coli*



Fonte: Adaptado de PADOVANI (2023)

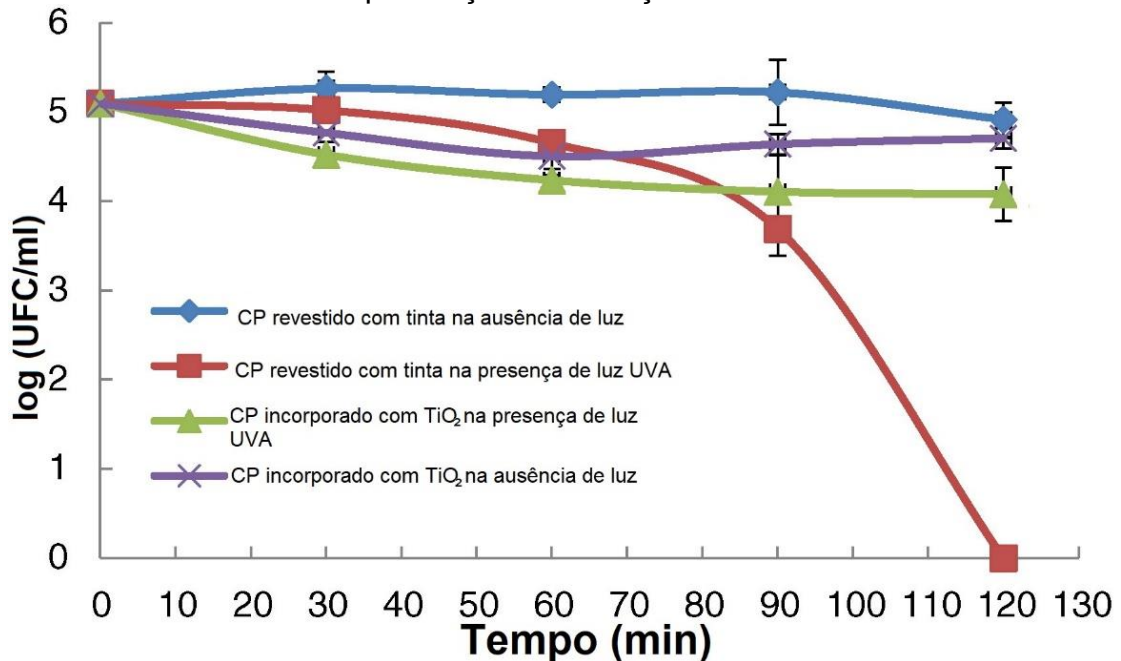
Para avaliar a capacidade de argamassas com incorporação de TiO_2 em sua matriz cimentícia e argamassas revestidas com tinta à base de TiO_2 , Guo et al. (2015) utilizou como microrganismo modelo a *Escherichia Coli K12* (*E. coli K12*). A *E. coli* é uma bactéria amplamente utilizada em testes fotocatalíticos bactericidas por serem consideradas indicadores sanitários, além da facilidade de reprodução em laboratório.

A suspensão preparada com a bactéria foi pipetada na superfície das amostras, em seguida, foram posicionadas em placas de Petri e então expostas as lâmpadas UVA utilizadas na degradação de NO_x e de xileno. Para avaliar a quantidade de UFC presente nos corpos de prova, foi feita uma lavagem utilizando 20 ml de uma solução de cloreto de sódio, em quatro intervalos de tempo pré-determinados.

O potencial bactericida dos corpos de prova foi avaliado tanto com irradiação UVA quanto sem. Na ausência de luz, Guo et al. (2015) observaram que nenhuma das amostras exibiu atividade bactericida fotocatalítica. No entanto, após 120 minutos de exposição à irradiação UVA, as amostras revestidas com tinta eliminaram completamente as colônias bacterianas, enquanto as amostras com TiO_2 incorporado mostraram apenas uma leve redução no número de unidades formadoras de colônias, conforme apresentado na Figura 18. Esses resultados destacam a eficiência da aplicação superficial de tintas fotocatalíticas, especialmente pela facilidade de aplicação, tornando-se uma abordagem promissora em ambientes com condições sanitárias precárias, ao reduzir a proliferação bacteriana enquanto medidas adicionais são implementadas. Entretanto, a eficácia desse método sob luz visível ainda deve

ser avaliada, já que, sem essa adaptação, o uso de fotocatalise bactericida ficaria limitado a locais onde a instalação de lâmpadas UVA é viável (Guo et al., 2013).

Figura 18 - Inativação fotocatalítica de *E. coli* K12 em argamassas na ausência e na presença de irradiação UVA



Fonte: Adaptado de Guo et al. (2015)

Legenda: UFC: Unidades Formadoras De Colônias

O trabalho realizado por Guerra et al. (2023) estudou a capacidade do dióxido de titânio de inibir o crescimento do fungo *Aspergillus niger* (*A. niger*), quando aplicado por aspersão superficial em argamassas de cal calcítica, comum em edifícios históricos brasileiros.

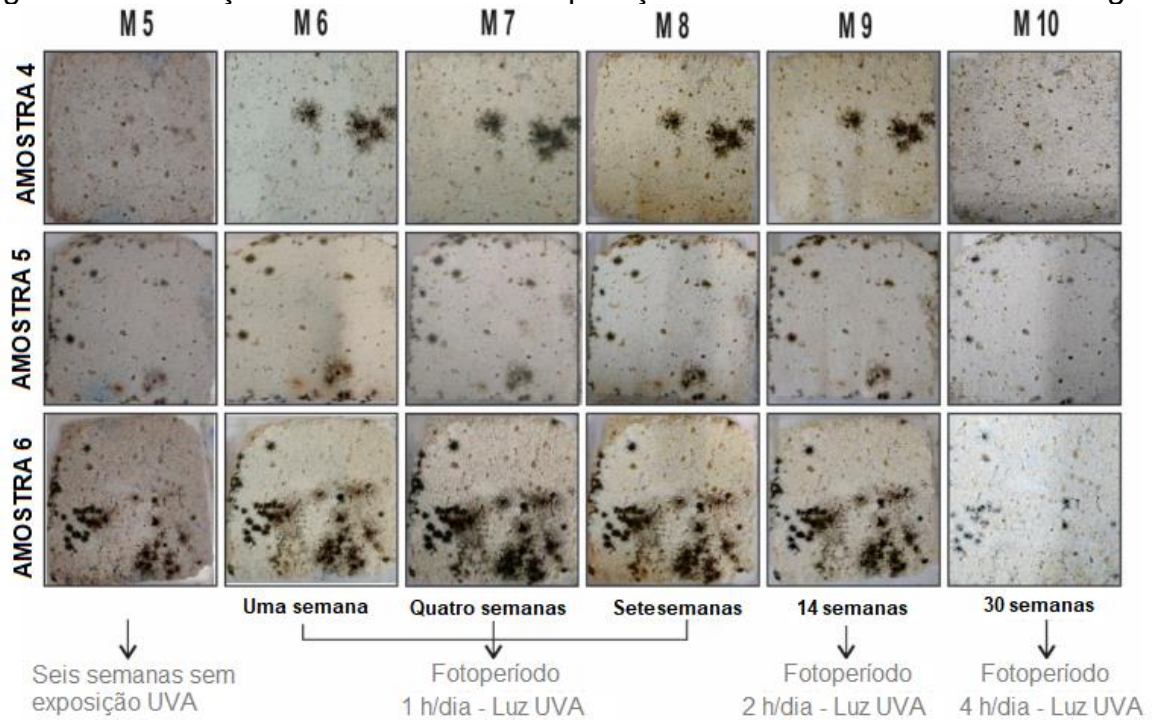
Após a desmoldagem, os corpos de prova foram deixados por 10 dias em uma câmara com umidade relativa do ar fixada em 80% e concentração de CO₂ de 5%, induzindo o processo de carbonatação, de forma a reduzir o pH das amostras, tornando o meio mais suscetível ao crescimento de fungos.

A suspensão de TiO₂, preparada com água deionizada a uma concentração de 3%, foi aplicada na superfície dos corpos de prova utilizando uma pistola de tinta pressurizada, em duas camadas aplicadas de forma transversal. Após a secagem completa, os corpos de prova foram esterilizados e receberam uma camada de líquido nutricional para criar um meio adequado ao crescimento de fungos. Em seguida, foram inoculados com 1 ml de uma suspensão contendo 10⁶ esporos/ml, com seis repetições para garantir a consistência dos resultados.

O experimento realizado por Guerra et al. (2023) foi conduzido em uma incubadora de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), que permitiu o controle preciso de temperatura e umidade do ar. Para simular a exposição à radiação ultravioleta, as lâmpadas originais da incubadora foram substituídas por lâmpadas de luz negra com comprimento de onda UVA entre 364-384 nm, conectadas a um sistema de controle de fotoperíodo. As amostras, com e sem fotocatalisador, foram submetidas a três diferentes durações de exposição diária à radiação UVA (1 h/dia, 2 h/dia e 4 h/dia), ao longo de aproximadamente 211 dias. Durante esse período, foram realizadas 10 medições com um espectrofotômetro portátil para avaliar a eficácia fotocatalítica e a inibição do crescimento fúngico nas amostras.

Nas amostras tratadas com TiO_2 , antes da ativação das lâmpadas UVA, foi observado o crescimento de colônias de *Aspergillus niger* 12 dias após a inoculação. Trinta dias após a ativação das lâmpadas, com um fotoperíodo de 1 h/dia, as colônias atingiram seu crescimento máximo. Ao final da sétima semana, o fotoperíodo foi ajustado para 2 h/dia, resultando em uma leve redução no tamanho das colônias. Quatorze semanas após a ativação, o fotoperíodo foi novamente alterado para 4 h/dia, e, durante as 15 semanas seguintes, foi observada uma redução significativa nas colônias. A evolução do experimento, a partir da medição com espectrofotômetro realizada imediatamente antes da ativação das lâmpadas está apresentada na Figura 19. Em contraste, os corpos de prova que não receberam o tratamento com TiO_2 apresentaram uma redução mínima no crescimento das colônias ao longo de todo o período de exposição à luz UVA (211 dias), conforme apresentado na Figura 20.

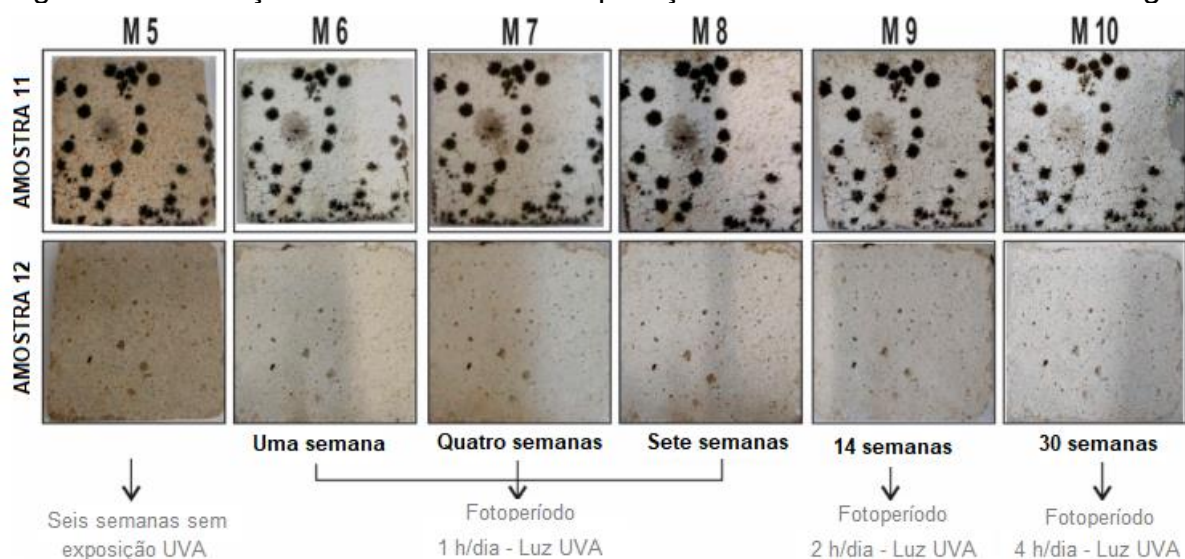
Figura 19 - Evolução das amostras com aplicação de TiO₂ inoculadas com *A. niger*



Fonte: Adaptado de Guerra et al. (2023)

Através do software *ImageJ* os autores quantificaram a área de crescimento do fungo em cada fotografia feita ao longo do experimento. Foi constatado uma redução média de 97% das manchas causadas pelo fungo nas amostras em que houve aplicação de TiO₂; enquanto nas amostras sem fotocatalisador foi observado uma redução de 40% das manchas.

Figura 20 -Evolução das amostras sem aplicação de TiO₂ inoculadas com *A. niger*



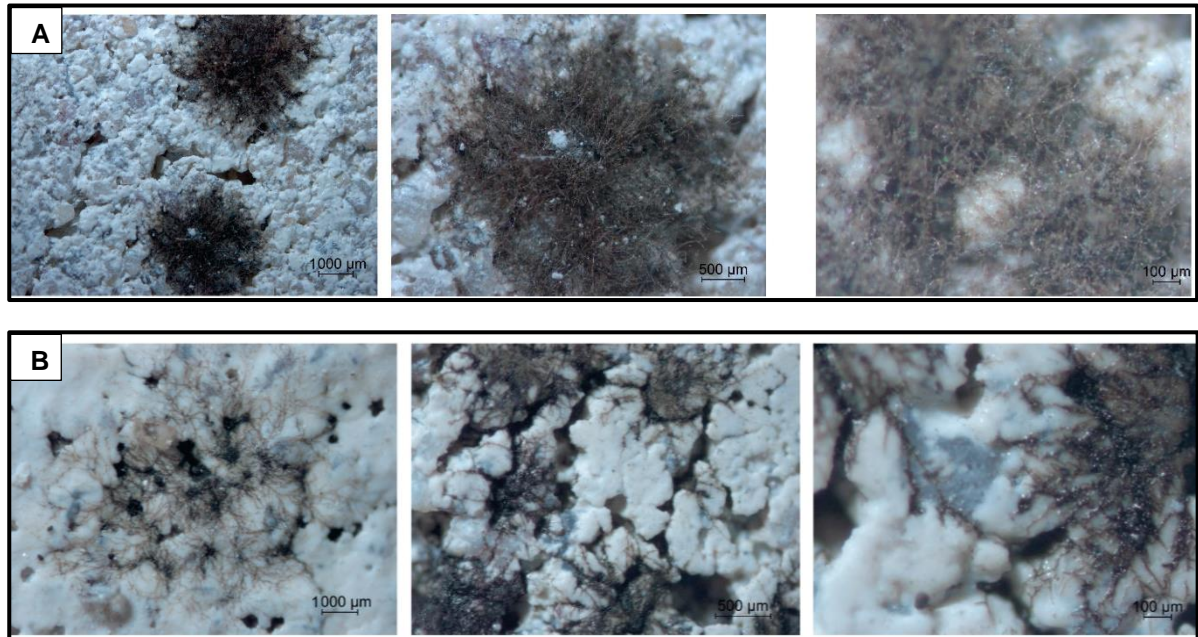
Fonte: Adaptado de Guerra et al. (2023)

Os valores obtidos pelo espectrofotômetro para as amostras com fotocatalisador, expressos como variação de cor ΔE^* em relação à medição inicial, confirmam as observações visuais. Entre as medições realizadas nas semanas 4 e 7 após a ativação das lâmpadas, houve um aumento nos valores de ΔE^* , refletindo o crescimento das colônias de fungo. No entanto, a partir da 14ª semana de exposição à luz UVA, os valores de ΔE^* começaram a diminuir, e na última medição atingiram os menores níveis, indicando a efetiva redução das colônias de fungo nas amostras tratadas com TiO_2 , coincidindo com os resultados obtidos visualmente por Guerra et al. (2023)

Os resultados obtidos por Guerra et al. (2023) demonstraram o grande potencial do dióxido de titânio na redução do crescimento de fungos. As imagens capturadas por estereoscópio (Figura 21) revelaram alterações morfológicas significativas nas estruturas fúngicas presentes na superfície tratada com o fotocatalisador, sugerindo um ambiente desfavorável para a sobrevivência dos microrganismos. Na Figura 21 - A é possível observar que as colônias de fungo nas amostras sem dióxido de titânio apresentam coloração escura, com várias estruturas aéreas e boa ramificação; já na Figura 21 – B as colônias começaram a apresentar formato alongado, com redução nas estruturas aéreas, além de apresentarem uma espécie de camada de um pó branco em sua superfície, indicando que foi expelido uma secreção como forma de tentar sobreviver ao ambiente hostil proporcionado pelo TiO_2 . Isso ocorre porque o processo de fotocatalise gera radicais oxidativos que rompem as membranas celulares dos fungos, danificando suas enzimas e levando-os à morte.

Contudo, a limitação deste método está na ativação dos fotocatalisadores, que geralmente exigem luz UV, restringindo sua aplicação a ambientes com exposição direta a essa radiação. Além disso, a durabilidade das suspensões superficiais de TiO_2 pode ser comprometida quando aplicadas em áreas sujeitas à abrasão ou à ação constante de fatores climáticos, como chuva e vento (Bersch et al., 2023).

Figura 21 - Colônias de *Aspergillus niger* A) em amostras sem TiO_2 , e B) em amostras com TiO_2



Fonte: Adaptado de Guerra et al. (2023)

5.3 AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE E DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS EM ARGAMASSAS REVESTIDAS COM TiO_2

A aplicação de dióxido de titânio em argamassas de revestimento como fotocatalisador para a degradação de poluentes tem se mostrado eficaz. No entanto, é fundamental avaliar se o uso desse material afeta as propriedades físicas e mecânicas da argamassa, garantindo que os requisitos mínimos de resistência, aderência e durabilidade sejam mantidos. Outro aspecto crucial a ser considerado é a durabilidade do revestimento fotocatalítico, principalmente quando o TiO_2 é aplicado superficialmente. A perda de partículas do fotocatalisador ao longo do tempo, causada por abrasão ou condições climáticas adversas, pode comprometer a eficiência do revestimento, reduzindo sua capacidade de degradação de poluentes e, conseqüentemente, diminuindo sua eficácia a longo prazo. (Bersch et al., 2023)

De forma geral, os testes realizados com argamassas que contêm dióxido de titânio incorporado à mistura indicam que há a necessidade de aumentar a relação água/aglomerante em comparação às argamassas convencionais, a fim de manter a trabalhabilidade. O pó de dióxido de titânio disponível comercialmente geralmente possui escala nanométrica, o que infere que as partículas possuem elevada área superficial específica, o que resulta em maior reatividade, contribuindo positivamente

para as reações fotocatalíticas almeçadas, mas também acarreta em maior capacidade de adsorção nas partículas.

No entanto, o aumento da quantidade de água pode comprometer as propriedades mecânicas e físicas da argamassa. Por isso, em muitos casos, a solução mais adequada é a utilização de aditivos plastificantes, que permitem alcançar a trabalhabilidade ideal sem a necessidade de adicionar mais água, preservando assim a integridade das propriedades físicas do material, como resistência e durabilidade. Alguns autores, buscando evitar um ajuste na relação água/aglomerante, realizaram a dispersão do fotocatalisador em parte da água de amassamento, e então adicionaram essa suspensão a mistura (Wu et al., 2022). Nos casos em que o volume de materiais com granulometria pequena é alto, o método de dispersão pode não ser suficiente, sendo necessário utilizar um plastificante, como feito por Guo et al (2015).

A ABNT NBR 13281-1 prioriza critérios relacionados à aderência e durabilidade para a classificação de argamassas de revestimento, utilizando ensaios como a resistência potencial de aderência à tração ao substrato e a resistência potencial à tração superficial. Apesar disso, os estudos sobre argamassas fotocatalíticas frequentemente focam na resistência à compressão como parâmetro principal de análise. No estudo realizado por Wu et al. (2022), foram conduzidos ensaios de resistência à compressão em amostras contendo Ag-TiO₂ (razão molar de 2%) e em uma amostra controle, que recebeu a incorporação de TiO₂ sem nenhum conteúdo de prata. Os valores de resistência obtidos estão apresentados na Tabela 1. Após 28 dias, as amostras com incorporação de Ag-TiO₂ na mistura (M2) apresentaram uma redução de 7% na resistência à compressão em comparação à amostra controle, enquanto as amostras que receberam a solução de Ag-TiO₂ superficialmente (S2) não apresentaram redução. Esse comportamento era esperado, já que, na aplicação superficial, não há interação direta entre as partículas da argamassa e o fotocatalisador que possa influenciar na formação de produtos que afetem a resistência mecânica.

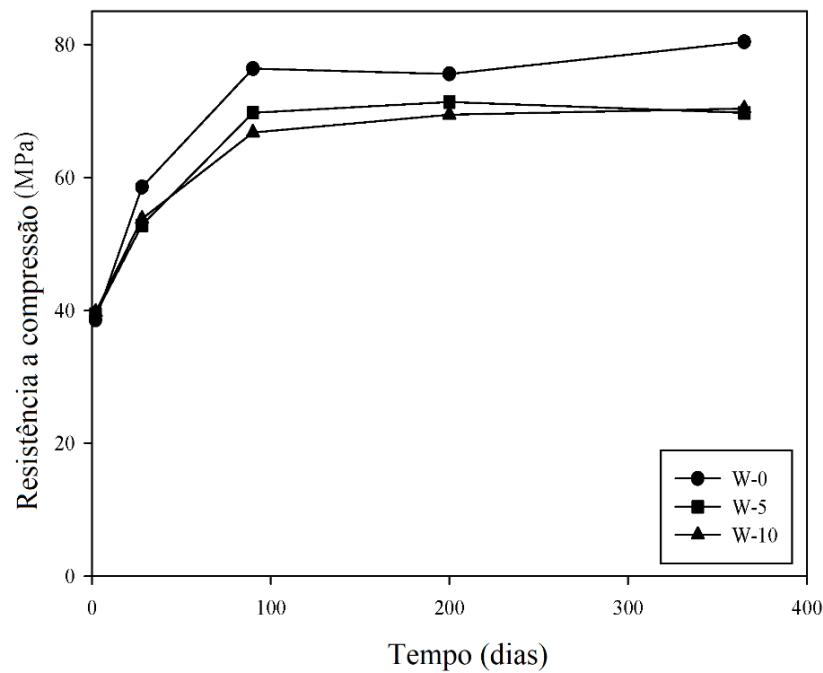
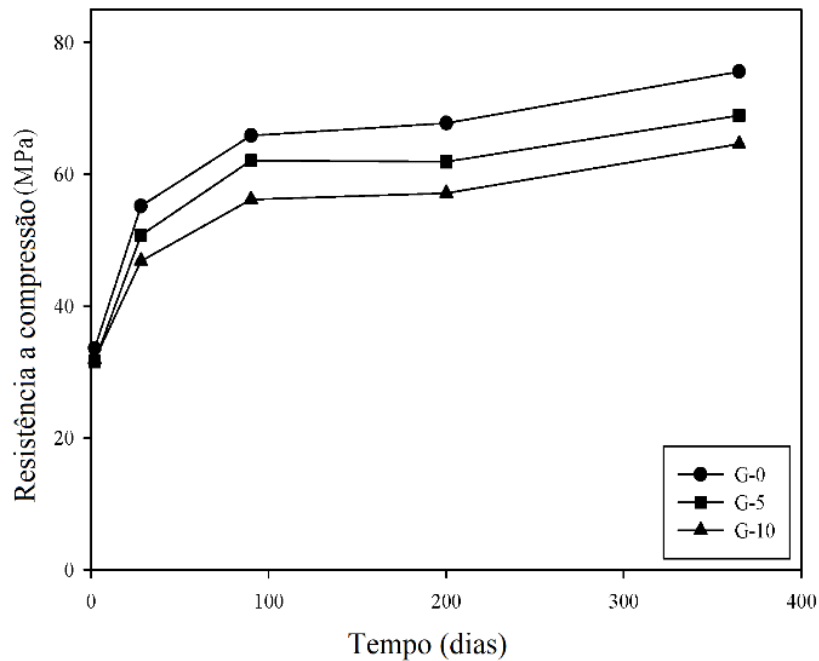
Tabela 1 - Resistência a compressão das amostras controle, M2 e S2 aos 7 e 28 dias

Amostra	Resistência a compressão (MPa)	
	7 dias	28 dias
Controle	25,3	30,2
M2	22,4	28,1
S2	25,9	31,2

Fonte: Adaptado de Wu et al. (2022)

Hernández-Rodríguez et al. (2019) observaram um comportamento semelhante ao avaliar a resistência à compressão em amostras de argamassa contendo fotocatalisador, produzidas tanto com cimento cinza quanto com cimento branco. O dióxido de titânio foi incorporado diretamente à mistura, e os testes de resistência à compressão foram realizados após 2, 28, 90, 200 e 365 dias de cura. A partir do 28º dia, observou-se uma redução na resistência em relação às amostras de controle, sendo essa queda mais pronunciada nas amostras com 10% de TiO_2 em relação à massa de cimento conforme indicado na Figura 22. Isso pode ser explicado pela tendência das partículas de dióxido de titânio de se aglomerarem na matriz cimentícia, acumulando-se ao redor dos hidratos de cimento e prejudicando o desenvolvimento da resistência mecânica (Lee et al., 2019). Esse acúmulo não uniforme também interfere na hidratação do cimento e aumenta a porosidade da argamassa.

Figura 22 - Resistência a compressão de amostras produzidas com cimento cinza (G) e cimento branco (W), com incorporações de 0%, 5% e 10% de TiO_2



Fonte: Adaptado de Hernández-Rodríguez et al. (2019)

Durante a preparação da argamassa com cimento branco, Hernández-Rodríguez et al. (2019) observaram que o aumento no teor de dióxido de titânio na mistura tornava a massa mais seca. Ao analisar a porosidade e o percentual de hidratação das amostras, constataram que, com o aumento da quantidade de TiO_2 , o percentual de hidratação das amostras com cimento branco diminuía, enquanto a

porosidade aumentava, incluindo o crescimento do tamanho médio dos poros. Esses resultados sugerem que o TiO_2 pode interferir na formação adequada dos produtos de hidratação do cimento, possivelmente devido à sua alta área superficial, que retém mais água durante a mistura, reduzindo a disponibilidade de água para a hidratação.

Além disso, ao avaliar o tempo de pega, foi identificado que o fotocatalisador atuava como um acelerador de pega quando incorporado em teores de, pelo menos, 5% em relação à massa de cimento. Por outro lado, nas amostras com cimento cinza, não foram observadas mudanças tão pronunciadas no percentual de hidratação, embora o aumento da porosidade tenha sido notado, mantendo-se, no entanto, o tamanho médio dos poros constante. Isso sugere que o tipo de cimento também pode influenciar a interação entre o fotocatalisador e a matriz cimentícia.

Guo et al. (2015) observaram que o uso de superplastificante nas argamassas com adição de TiO_2 visando manter a mesma fluidez alcançada nas amostras de argamassa sem a adição do fotocatalisador resultou em um aumento de 12% na resistência à compressão. Esse ganho de resistência pode ser atribuído à melhor dispersão das partículas proporcionada pelo superplastificante. Partículas melhor distribuídas ocupam os espaços de maneira mais uniforme, minimizando o surgimento de vazios na matriz cimentícia. Além disso, essa dispersão otimizada promove uma melhor ligação entre as partículas, o que contribui para o aumento da resistência mecânica da argamassa.

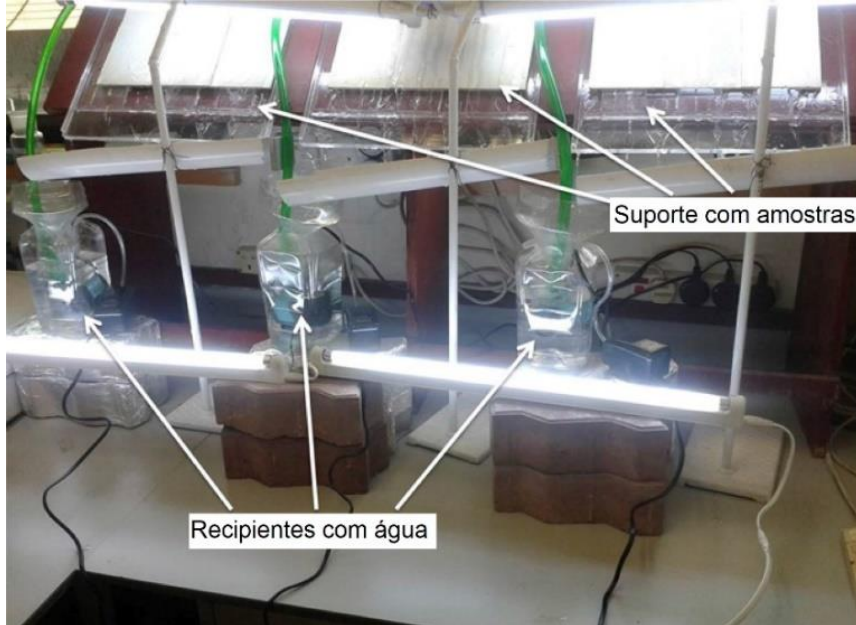
Dentre as diversas formas de estudar a durabilidade de um material, no que tange argamassas autolimpantes com uso de fotocatalisadores, a forma mais relevante é por meio de ciclos de intemperismo.

Após os estudos realizados por Guo et al. (2015) sobre a eficácia do dióxido de titânio como fotocatalisador de moléculas orgânicas e inorgânicas, os autores realizaram a análise da durabilidade de três tipos de amostras de argamassa arquitetônica com vidro reciclado (Guo et al., 2016): o primeiro tipo com incorporação na mistura da argamassa de 5% de TiO_2 em relação a massa de aglomerantes; o segundo revestindo a superfície da argamassa com tinta à base de TiO_2 , com teor 10% de dióxido de titânio; e o último com a aplicação na superfície das amostras com uma suspensão de TiO_2 em água destilada deionizada.

Os autores (Guo et al., 2016) simularam ciclos de chuva e seca simultaneamente aos ciclos de noite e dia, com duração de 12 horas cada. Durante o período de chuva, as lâmpadas usadas para simular a radiação UVA e visível foram

mantidas desligadas; ao término do ciclo de chuva, as lâmpadas eram então ligadas. O experimento foi conduzido por 14 dias, com os resultados organizados em dois períodos de 7 dias. A Figura 23 apresenta o aparato feito pelos autores para realizar os ciclos de intemperismo.

Figura 23 - Aparato para simulação de condições climáticas



Fonte: Adaptado de Guo et al. (2016)

A avaliação da durabilidade das argamassas foi feita por meio da degradação de Rhodamina-B, sendo que dois critérios foram estabelecidos: a degradação após 4 horas devia ser maior que 20% ($D_4 > 20\%$) e após 26 horas maior que 50% ($D_{26} > 50\%$). Os valores de degradação obtidos por Guo et al. (2016) referente a exposição das amostras a radiação UVA estão apresentados na Tabela 2. Para facilitar a apresentação dos dados, foi adotada a seguinte nomenclatura: **mistura** para as amostras produzidas com TiO_2 incorporado em sua matriz cimentícia; **tinta** para as amostras revestidas com tinta; e, por fim, **suspensão** para as amostras revestidas com a suspensão de TiO_2 .

Tabela 2 - Valores de degradação de Rhodamina-B das amostras de argamassa expostas a radiação UVA a cada ciclo de intemperismo

Amostra	Antes dos ciclos de intemperismo		Semana 1		Semana 2	
	D ₄	D ₂₆	D ₄	D ₂₆	D ₄	D ₂₆
Mistura	4,7%	12,5%	13,2%	31,0%	27,2%	43,5%
Tinta	51,4%	63,6%	56,6%	56,8%	50,2%	52,6%
Suspensão	57,2%	63,6%	30,7%	41,2%	25,5%	41,7%

Fonte: Adaptado de Guo et al. (2016)

Dos três métodos testados, o revestimento com tinta demonstrou maior resistência a condições climáticas adversas, mantendo sua capacidade de degradação do corante acima de 50%. o revestimento com suspensão de TiO₂ apresentou uma queda praticamente contínua na eficiência, indicando que, durante os ciclos de intemperismo, uma quantidade significativa de partículas do fotocatalisador foi removida do substrato. As amostras com TiO₂ incorporado diretamente na matriz cimentícia, embora tenham mostrado baixa eficiência inicial de degradação, tiveram um aumento progressivo na atividade fotocatalítica ao longo do experimento. Esse comportamento pode ser atribuído ao desgaste da superfície provocado pelo intemperismo, que aumenta a rugosidade e expõe mais partículas fotocatalíticas, potencializando a ação fotocatalítica.

Zouzelka et al. (2017) realizaram um estudo comparativo entre amostras de concreto recém revestidas com tinta à base de TiO₂ e amostras retiradas de uma parede revestida 2 anos antes com a mesma tinta (Figura 24), em relação a durabilidade do revestimento e sua eficiência de degradação de NO_x. A parede revestida com tinta estava localizada em uma via pública de tráfego intenso de veículos em Praga, República Tcheca, sendo utilizada por aproximadamente trinta mil veículos por dia, com registros de concentração de NO₂ frequentemente acima do limite de 40 µg/m³.

Figura 24 - Retirada de amostras da parede em via pública revestida com tinta à base de TiO_2



Fonte: Retirado de Zouzelka et al. (2017).

Conforme a Tabela 3, os resultados dos autores nas condições de maior concentração inicial de NO ($122,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) mostraram uma queda de 20% na capacidade de degradação do óxido nítrico nas amostras revestidas com tinta retiradas da aplicação in loco em comparação com as amostras recém-aplicadas. Em relação ao dióxido de nitrogênio (NO_2), com concentração inicial de $188 \mu\text{g}/\text{m}^3$, foi observado um decréscimo de 50% na eficiência de degradação. O óxido nítrico liberado no ambiente é eventualmente oxidado, transformando-se em NO_2 . Assim, uma maior capacidade de degradação de NO implica em menores níveis de NO_2 na atmosfera, sugerindo que a redução na eficiência observada pelos autores pode não estar diretamente relacionada à perda de sítios ativos de fotocatalise, e sim a menor disponibilidade de NO_2 (Zouzelka et al., 2017).

Tabela 3 - Resultados de degradação de NO_x

Amostra	Gás	Concentração de entrada de NO_x (ppmv)	Estado equilíbrio $r(\Delta\text{NO}_x)$ ($\mu\text{mol}/\text{m}^2.\text{h}$)
Nova	NO	0,1	74
Envelhecida	NO	0,1	59
Nova	NO_2	0,1	59
Envelhecida	NO_2	0,1	27

Fonte: Adaptado de Zouzelka et al. (2017)

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi explorado o uso do dióxido de titânio em argamassas a fim de conferir propriedades autolimpantes, visando a degradação de compostos orgânicos, inorgânicos, além de fungos e bactérias.

A aplicação de TiO_2 tem mostrado resultados promissores em estudos, sendo capaz de degradar pelo menos 50% da concentração inicial de poluentes. No entanto, a incorporação do dióxido de titânio em argamassas apresenta algumas limitações que devem ser analisadas cuidadosamente antes de sua aplicação prática. A ativação fotocatalítica do TiO_2 ocorre sob radiação UVA, que representa apenas cerca de 5% da radiação solar, limitando, assim, o potencial de uso do fotocatalisador em ambientes em que não é possível realizar a instalação de iluminação UV artificial.

A deposição de metais, como a prata, tem sido uma abordagem eficiente e relativamente acessível para melhorar a resposta do TiO_2 à luz visível. No entanto, há poucos estudos que exploram a aplicação do TiO_2 dopado com prata ($\text{TiO}_2\text{-Ag}$) em argamassas. Além disso, a maioria das pesquisas utiliza compósitos sintetizados em laboratório, e não há referências desses compósitos estarem disponíveis comercialmente, o que dificulta a aplicação real na construção civil, já que a contratação de laboratórios especializados para a síntese desses materiais pode prejudicar o fluxo construtivo, além de encarecer o orçamento da obra. Outro ponto a considerar é que a deposição de prata altera a cor do TiO_2 , escurecendo o material e reduzindo sua atratividade para revestimentos.

A aplicação superficial do fotocatalisador por meio de métodos de aspersão utilizando solventes como água faz com a adesão com o substrato dependa somente de ligações eletrostáticas, o que ocasiona na eventual deterioração e perda na atividade fotocatalítica. A incorporação de TiO_2 com aglomerantes faz com que a adesão ao substrato seja forte o suficiente para resistir as ações climáticas, porém a escolha do aglomerante deve ser feita de forma a considerar que as partículas do fotocatalisador não fiquem obstruídas, impedindo sua atividade.

Quanto ao método de aplicação mais eficaz, a tinta à base de TiO_2 demonstrou ser a melhor opção, apresentando as melhores taxas de degradação, e também a maior resistência a condições climáticas. Além disso, é um método simples, que não necessita de capacitação. A aplicação superficial de TiO_2 por meio de suspensões do fotocatalisador também apresentou boas taxas de degradação, porém tem baixa

durabilidade, se soltando do substrato conforme sofre as ações climáticas. A incorporação de dióxido de titânio na matriz cimentícia seria outra alternativa de fácil aplicação, porém não apresenta resultados satisfatórios de degradação. Uma saída para esse problema seria realizar a aplicação bicamada, onde apenas a camada superior com pequena espessura receberia o fotocatalisador. A adesão entre o material fotocatalítico e o substrato é crucial para prevenir a deterioração e diminuição da atividade fotocatalítica.

REFERÊNCIAS

- Ameta, R.; et al. Photocatalysis. In: Ameta, S. C.; Ameta, R. Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: emerging green chemical technology. Chennai: Elsevier, 2018. p. 412. DOI: 10.1016/j.cej.2020.128207
- Anton, L. B.; Braga, N. A. Nanopartículas de TiO₂: síntese pelo método sol-gel e técnicas de caracterização. *Scientia Amazonia*, v. 4, n. 2, p. 36-59, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13281-1: Argamassas inorgânicas – requisitos e métodos de ensaio: Parte 1: Argamassas para revestimento de paredes e tetos. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13529: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- Balbuena, J.; et al. Use of steel industry wastes for the preparation of self-cleaning mortars. *Materials*, 2019, p. 1-13, n.4, v.12. MDPI AG. DOI: 10.3390/ma12040621
- Bersch, J.D.; et al. Photocatalytic TiO₂-Based Coatings for Mortars on Facades: A Review of Efficiency, Durability, and Sustainability. *Buildings*, 2023, p. 1-35, v: 13, n 1: 186. DOI: 10.3390/buildings13010186
- Bezerra, L. B.; et al. Theoretical-experimental study of the advanced oxidative process using peracetic acid and solar radiation: removal efficiency and thermodynamic elucidation of radical formation processes. *Journal Of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2022, p. 7, 423. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.jphotochem.2021.113615.
- Bousiakou, L. G.; et al. Optical, structural and semiconducting properties of Mn doped TiO₂ nanoparticles for cosmetic applications, *Journal of King Saud University - Science*, 2022, p.7, 34 (3). DOI: 10.1016/j.jksus.2021.101818.
- Brito, G. F. S.; et al. Evaluation of advanced oxidative processes in biodiesel wastewater treatment. *Journal Of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2019, p. 6, 375. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.jphotochem.2019.01.013.
- Castro-Hoyos, A. M.; et al. Challenges and Opportunities of Using Titanium Dioxide Photocatalysis on Cement-Based Materials. *Coatings*, 2022, p. 1-21, v. 12, n. 7: 968. DOI: 10.3390/coatings12070968
- Chen, Y.D.; et al. Advanced oxidation processes for water disinfection: features, mechanisms and prospects. *Chemical Engineering Journal*, 2021, p. 22, 409. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.cej.2020.128207.
- Di Paola, A.; et al. Brookite, the least known TiO₂ photocatalyst, *Catalysts*, 2013, p. 38, 3. DOI: 10.3390/catal3010036

Diebold, U. The surface science of titanium dioxide, *Surface Science Reports*, 2003, p. 177, 48 (5-8). DOI: 10.1016/S0167-5729(02)00100-0.

Dio Padre Misericordioso Church. Disponível em: <https://www.heidelbergmaterials.com/en/dio-padre-misericordioso>. Fotografia color. Acesso em: 16 de abril de 2024.

Guerra, F.L.; et al. The Effectiveness of Spraying nTiO₂ on Coating Mortars in Historical Buildings Aimed at Reducing Fungal Growth. *Buildings*, 2023, p. 1-19, v. 13, no. 11: 2751. DOI: 10.3390/buildings13112751

Guerrini, G. L. Photocatalytic performances in a city tunnel in Rome: NO_x monitoring results. *Construction and building materials*, 2011, p. 165-175, v. 27, n. 1. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.07.065

Guo, M. Z.; et al. Nano-TiO₂-based architectural mortar for NO removal and bacteria inactivation: Influence of coating and weathering conditions. *Cement and Concrete Composites*, 2013, p. 101-108, v. 36, DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2012.08.006.

Guo, M. Z.; et al. Self-cleaning ability of titanium dioxide clear paint coated architectural mortar and its potential in field application. *Journal of Cleaner Production*, 2016, p. 3583-3588, v. 112. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.10.079.

Guo, M. Z.; et al. Versatile photocatalytic functions of self-compacting architectural glass mortars and their inter-relationship. *Materials & Design*, 2015, p. 1260-1268, v. 88. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.09.133.

Hanaor, D. A. H.; Sorrel, C. C. Review of the anatase to rutile phase transformation, *Journal of Materials Science*, 2010, p. 20, 46. DOI: 10.1007/s10853-010-5113-0

Hernández-Rodríguez, M. J.; et al. Effect of TiO₂ Addition on Mortars: Characterization and Photoactivity. *Applied Sciences*, 2019, p.1-13, v. 9, n. 13: 2598. DOI: 10.3390/app9132598

Hernández-Rodríguez, M.J.; et al. Comparison of supported TiO₂ catalysts in the photocatalytic degradation of NO_x. *Journal Of Molecular Catalysis A: Chemical*. Elsevier BV, 2016, p. 56-66, v. 413. DOI: 10.1016/j.molcata.2015.12.007.

i.lab, Research and Innovation Centre. Disponível em: <https://www.heidelbergmaterials.com/en/i-lab>. Fotografia color. Acesso em: 16 de abril de 2024.

Lapidus, A.; et al. Self-Cleaning Cement-Based Building Materials. *Buildings*, 2022, p. 1-24, v. 12, n. 5: 606. DOI: 10.3390/buildings12050606

Lee, J.-W.; et al. Photocatalytic and Pozzolanic Properties of Nano-SiO₂/Al₂O₃-TiO₂ Powder for Functional Mortar. *Materials*, 2019, p. 1-16, v. 12, no. 7: 1037. DOI: 10.3390/ma12071037

- Luttrell, Tim; et al. Why is anatase a better photocatalyst than rutile? - Model studies on epitaxial TiO₂ films. *Scientific Reports*, 2014, p.8, 4 (1). Springer Science and Business Media LLC. DOI: 10.1038/srep04043.
- Mocioiu, A.-M.; et al. Self-Cleaning and Antibacterial Properties of the Cement Mortar with ZnO/Hydroxyapatite Powders. *Inorganics*, 2022, p. 10, 241. DOI: 10.3390/inorganics10120241
- Padovani, G. S. Propriedades fotocatalíticas de fibras de PVDF/TiO₂-Ag produzidas pela técnica de fiação por sopro em solução. 81 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - Unesp, Ilha Solteira, 2018.
- Padovani, G. S. Produção de fibras de PEO unidirecionais com incorporação de quitosana/utilização de membranas de PVDF/TiO₂ como filtro fotocatalítico e antibacteriano. 139 f. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - Unesp, Ilha Solteira, 2023.
- Pelaez, M.; et al. A review on the visible light active titanium dioxide photocatalysts for environmental applications. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2012, p. 19, 125. DOI: 10.1016/j.apcatb.2012.05.036
- Qahtan, T. F.; et al. State-of-the-art, challenges and prospects of heterogeneous tandem photocatalysis. *Coordination Chemistry Reviews*, 2023, p. 23, 492. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.ccr.2023.215276.
- Reyes-Coronado, D. et al. Phase-pure TiO₂ nanoparticles: anatase, brookite and rutile. *Nanotechnology*, 2008, p. 10, 19. DOI: 10.1088/0957-4484/19/14/145605
- Takci, D. K. Synthesis, characterization and dielectric properties of rutile TiO₂ nanoflowers. *Journal of Crystal Growth*, 2022, p.7, 578. DOI: 10.1016/j.jcrysgr.2021.126442.
- Ulas, M. A.; et al. Valorization of recycled aggregates to eco-efficient lightweight self-compacting mortars: studies on microstructure, mechanical, durability, environmental, and economic properties. *Construction And Building Materials*, 2024, p. 1-17, v. 419. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135436.
- Vodafone Village. Disponível em: <https://www.heidelbergmaterials.com/en/vodafone-village>. Fotografia color. Acesso em: 16 de abril de 2024.
- WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization; 2021. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- Wu, L.; et al. Study on Photocatalytic Performance of Ag/TiO₂ Modified Cement Mortar. *Materials*, 2022, p.1-15, v. 15, n. 11: 4031. DOI: 10.3390/ma15114031

Žerjav, G; et al. Effect of Surface Chemistry and Crystallographic Parameters of TiO₂ Anatase Nanocrystals on Photocatalytic Degradation of Bisphenol A. *Catalysts*. 2019; 9(5):447. DOI: 10.3390/catal9050447

Zouzelka, R.; Rathousky, J. Photocatalytic abatement of NO_x pollutants in the air using commercial functional coating with porous morphology. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2017, p. 466-476, v. 217. DOI: 10.1016/j.apcatb.2017.06.009.