REVESTIMENTOS AUTOLIMPANTES E ABSORVEDORES SOLARES PARA APLICAÇÕES FOTOVOLTAICAS: UMA REVISÃO ABRANGENTE SOBRE MATERIAIS E TÉCNICAS.

Sahyonara Estrela de Lacerda Hussein Mélo [1] (sahyonarahussein@gmail.com), Kelly Cristiane Gomes [2] (gomes@cear.ufpb.br)

[1] Universidade Federal da Paraíba (UFPB); Departamento de Engenharia Mecânica
[2] Universidade Federal da Paraíba (UFPB); Departamento de Energias Renováveis

RESUMO: *Revestimentos autolimpantes à base de dióxido de titânio (TiO_2) e dióxido de silício (SiO_2) têm sido propostos para aplicação em superfícies de vidro com foco na proteção de módulos fotovoltaicos. As formulações são desenvolvidas por meio da rota sol-gel, uma técnica amplamente utilizada para obtenção de filmes finos com propriedades ópticas e funcionais. Na literatura, diferentes abordagens de aplicação desses revestimentos são descritas, incluindo dip-coating, pintura por spray e aplicação manual. Os estudos revisados abordam aspectos como morfologia superficial, hidrofilicidade, transmitância óptica na faixa UV-Vis, aderência ao substrato e uniformidade dos filmes. Em composições específicas, observou-se alta transparência (acima de 90%) e ângulos de contato inferiores a 10°, além de melhor desempenho dos revestimentos aplicados por dip-coating no que se refere à uniformidade e aderência. A literatura aponta que a combinação dessas propriedades pode tornar esses materiais alternativas promissoras para a redução do acúmulo de poeira e contaminantes em módulos solares, contribuindo para a preservação do desempenho e da eficiência energética, especialmente em regiões de clima semiárido.*

PALAVRAS-CHAVE: *REVESTIMENTOS AUTOLIMPANTES, FILMES FINOS, ENERGIA SOLAR, ROTA SOL-GEL, FOTOCATÁLISE.*

SELF-CLEANING AND SOLAR ABSORBER COATINGS FOR PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS: A COMPREHENSIVE REVIEW OF MATERIALS AND TECHNIQUES

ABSTRACT: *Self-cleaning coatings based on titanium dioxide (TiO_2) and silicon dioxide (SiO_2) have been proposed for application on glass surfaces intended for photovoltaic modules. These formulations are prepared using the sol-gel route, a technique widely employed in the synthesis of thin films with optical and functional properties. The literature highlights three main deposition techniques: dip-coating, spray coating, and conventional manual application. Several studies describe the use of these coatings and their potential for enhancing surface performance through parameters such as hydrophilicity, UV-Vis transmittance, substrate adhesion, and film uniformity. Reports indicate high transparency levels (above 90% in specific compositions), functional hydrophilicity (with contact angles below 10° in certain cases), and homogeneous film formation, particularly in samples deposited by dip-coating. The combination of these properties reinforces the potential use of such coatings as a passive strategy for reducing the accumulation of dust and other contaminants on solar energy systems. This can contribute to maintaining the performance and energy efficiency of photovoltaic modules, especially in semi-arid regions, where environmental conditions challenge the maintenance and long-term operation of solar technologies.*

KEYWORDS: *SELF-CLEANING COATINGS. THIN FILMS. SOLAR ENERGY. SOL-GEL ROUTE. PHOTOCATALYSIS.*

1. INTRODUÇÃO

A intensificação das mudanças climáticas, associada ao aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE), tem motivado esforços globais pela transição energética. A busca por fontes limpas, como a energia solar fotovoltaica, destaca-se como uma das estratégias mais promissoras para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e mitigar os impactos ambientais (IEA, 2023; LORENZI et al., 2020). No entanto, a eficiência dos módulos fotovoltaicos ainda é severamente comprometida por fatores ambientais, como a deposição de poeira, poluentes e outros contaminantes atmosféricos sobre suas superfícies ativas.

A sujidade acumulada em módulos fotovoltaicos pode ocasionar perdas superiores a 25% na conversão energética, especialmente em regiões semiáridas ou urbanas com elevado índice de material particulado (DARWISH et al., 2015; SALAMAH et al., 2022). Métodos convencionais de limpeza, como lavagem manual ou sistemas automatizados, implicam custos adicionais e consumo de água, tornando urgente o desenvolvimento de soluções passivas e de longa durabilidade (SAYYAH et al., 2014; ÇAMURLU et al., 2009).

Neste contexto, superfícies autolimpantes fotocatalíticas têm se consolidado como alternativas viáveis para atenuar a degradação do desempenho dos painéis. Materiais como o dióxido de titânio (TiO_2) e a sílica (SiO_2) são amplamente investigados devido às suas propriedades físico-químicas favoráveis, como transparência óptica, estabilidade térmica, atividade fotocatalítica e afinidade com a água (GOMES et al., 2023; GONÇALVES et al., 2021). Quando aplicados na forma de filmes finos, esses compostos promovem tanto a degradação de contaminantes orgânicos quanto o escoamento de partículas através da ação da água da chuva e da radiação ultravioleta (LIU et al., 2024; OEHLER et al., 2020).

Este trabalho tem como objetivo reunir e discutir, com base na literatura, estratégias de desenvolvimento de revestimentos funcionais à base de TiO_2 e SiO_2 aplicados por diferentes rotas de deposição sobre substratos de vidro, em contextos que simulam condições típicas de operação de módulos fotovoltaicos. A proposta contempla uma síntese das principais abordagens utilizadas por diversos autores, destacando aspectos relacionados às características morfológicas e ópticas desses revestimentos, bem como seu potencial na mitigação da sujidade, com foco em alternativas de baixo custo e alta aplicabilidade para sistemas solares em larga escala.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A formulação e aplicação de revestimentos autolimpantes à base de dióxido de titânio (TiO_2) e dióxido de silício (SiO_2) em substratos vidro, será conduzida com base em práticas metodológicas amplamente documentadas na literatura científica. O objetivo central consiste em avaliar a viabilidade técnica desses materiais em aplicações voltadas para módulos fotovoltaicos, considerando aspectos de síntese, aplicação e caracterização funcional.

A preparação dos substratos será realizada por meio de limpeza química padronizada, conforme o protocolo descrito por Wang et al. (2003), com o objetivo de promover melhor aderência dos filmes. Em seguida, as soluções precursoras de TiO_2 e SiO_2 serão sintetizadas utilizando reagentes como isopropóxido de titânio e tetraetoxisilano (TEOS), diluídos em álcool isopropílico e estabilizados com ácido acético.

A rota sol-gel seguirá os princípios estabelecidos por Brinker e Scherer (1990), que destacam a importância do controle da hidrólise e condensação para obtenção de soluções estáveis e homogêneas.

A aplicação dos revestimentos será realizada por três técnicas distintas: dip-coating, spray-coating e aplicação manual. O método de dip-coating, conforme descrito por Wang et al. (2003), será utilizado por sua capacidade de produzir filmes uniformes e com boa aderência ao substrato. Já o spray-coating será adotado com base na abordagem de Kim et al. (2017), que associam a adição de aditivos estabilizantes à aplicação por spray, visando controle da espessura e melhoria da rugosidade superficial. A aplicação manual, conforme explorada por Zhang et al. (2014), será considerada por sua simplicidade, permitindo avaliar os limites de técnicas de baixo custo e baixa complexidade.

Com o objetivo de fundamentar as decisões metodológicas adotadas neste trabalho, apresenta-se no Quadro 1 um comparativo entre os principais autores que abordam a síntese e aplicação de revestimentos por sol-gel. Esse levantamento permite visualizar as diferenças e inovações de cada metodologia, destacando os critérios que guiaram a escolha dos materiais, técnicas de deposição e parâmetros de caracterização.

TABELA 1. Comparativo entre metodologias adotadas por autores na literatura

Autor(es)	Foco Principal	Técnica de Aplicação	Inovação / Diferença
Brinker & Scherer (1990)	Síntese sol-gel e estabilidade da solução	-	Ênfase no controle da hidrólise e condensação na formulação da solução
Wang et al. (2003)	Uniformidade do filme e fotocatalisia	Dip-coating	Controle da velocidade de retirada e múltiplas camadas
Zhang et al. (2014)	Comparação entre métodos de aplicação	Dip, spray e manual	Avaliação comparativa de espessura, transparência e morfologia
Kim et al. (2017)	Controle da rugosidade superficial	Spray-coating	Uso de aditivos estabilizantes e surfactantes para melhor dispersão da solução
Fujishima et al. (2008)	Atividade autolimpante e UV	Dip-coating	Correlação entre ângulo de contato e desempenho autolimpante sob irradiação UV

Fonte: Autores (2025).

Com base nos estudos de Fujishima et al. (2008), espera-se que os revestimentos apresentem alta transparência, excelente hidrofilicidade, boa aderência e formação de filmes homogêneos, características essenciais para sistemas solares instalados em regiões semiáridas, onde a deposição de partículas pode comprometer o desempenho dos módulos fotovoltaicos.

Após a aplicação, os revestimentos serão submetidos a processos de secagem e cura térmica em estufa, com parâmetros de tempo e temperatura definidos com base em estudos prévios. As amostras obtidas serão caracterizadas quanto à morfologia, propriedades ópticas e funcionais, por meio das seguintes análises:

- Morfologia superficial, por microscopia óptica ou eletrônica;
- Hidrofilicidade, por medição do ângulo de contato estático;
- Transmissão óptica na faixa UV-Vis, utilizando espectrofotômetro;
- Aderência dos filmes, conforme a norma ASTM D3359;
- Uniformidade e espessura da camada, por análise visual e perfilometria.

3. RESULTADOS

Os revestimentos aplicados sobre os substratos de vidro apresentaram características morfológicas distintas conforme a técnica de deposição utilizada. A aplicação por dip-coating proporciona a formação de filmes mais homogêneos e contínuos, com boa uniformidade visual e baixa incidência de microfissuras. Já a deposição por spray resulta em películas com boa cobertura, porém com menor espessura e presença de microporos. A pintura manual, por sua vez, apresenta maior espessamento nas bordas e heterogeneidade superficial, sendo considerada menos eficaz do ponto de vista morfológico.

Estudos indicam que os revestimentos à base de TiO_2 e híbridos de SiO_2/TiO_2 tendem a manter altos níveis de transparência na faixa visível (400–800 nm), com valores superiores a 90% para filmes aplicados por dip-coating e acima de 85% para composições híbridas. Esses dados são compatíveis com os resultados apresentados por Almeida et al. (2021), que relatam perdas ópticas mínimas quando há um controle adequado da espessura durante a síntese por rota sol-gel.

Na avaliação da hidrofilicidade descrita na literatura, revestimentos com TiO_2 puro frequentemente apresentam ângulos de contato inferiores a 10°, evidenciando comportamento superhidrofílico. Já os revestimentos híbridos demonstram excelente molhabilidade, com valores variando entre 10° e 18°, resultado atribuído à presença de grupos hidroxila (–OH) remanescentes da rede de sílica e à atividade fotocatalítica do TiO_2. Essa característica é considerada fundamental para a função autolimpante, uma vez que favorece o espalhamento da água e contribui para a remoção de contaminantes superficiais por ação da chuva (GAZOTTI et al., 2020).

De acordo com estudos que empregaram o ensaio de aderência (ASTM D3359), os filmes aplicados por dip-coating costumam apresentar classificação entre 4B e 5B, evidenciando forte fixação ao substrato. Por outro lado, métodos como spray e pintura convencional tendem a alcançar classificações inferiores, como 3B, o que é frequentemente atribuído à ausência de texturização prévia da superfície ou à menor penetração do calor nas camadas superficiais durante a etapa de cura térmica.

A análise de absortância média evidencia ganhos significativos na capacidade de absorção para os filmes contendo TiO_2 calcinado, especialmente na faixa de 350–420 nm, devido à presença de estruturas cristalinas da fase anatásio, conforme também relatado por Xavier et al. (2022). Essa

característica é desejável em aplicações solares por potencialmente aumentar a retenção de energia luminosa, sem comprometer a transmitância global do sistema.

Estudos de exposição em ambiente externo sugerem que filmes superhidrofílicos demonstram resistência inicial à deposição de partículas de poeira, especialmente nos primeiros 30 dias de uso. Após períodos mais prolongados, como 60 dias, registra-se uma tendência de menor aderência de material particulado em comparação a superfícies não revestidas, resultando em ganhos médios de 12 a 18% na eficiência fotovoltaica simulada. Esses resultados destacam o potencial dos revestimentos funcionais em melhorar a durabilidade e o desempenho de módulos solares em condições de campo, conforme indicado por Jung et al. (2019) e corroborado por investigações realizadas no semiárido brasileiro (GONÇALVES et al., 2021).

4. CONCLUSÕES

Os revestimentos funcionais à base de TiO_2 e SiO_2 abordado neste trabalho demonstraram alto potencial de aplicação em módulos fotovoltaicos, especialmente em ambientes com elevada carga de poeira ou difícil acesso para manutenção. As formulações elaboradas pela rota sol-gel apresentam boa estabilidade coloidal, sendo compatíveis com diferentes técnicas de aplicação, das quais o dip-coating se destacou por proporcionar melhores resultados quanto à uniformidade, aderência e transparência óptica.

Os filmes apresentam comportamento superhidrofílico, promovendo o espalhamento da água e facilitando o desprendimento de partículas sólidas da superfície, o que caracteriza a função autolimpante. Os ângulos de contato inferiores a 10°, combinados com alta transmitância (> 90%), tornam esses revestimentos altamente promissores para a preservação do desempenho energético de sistemas fotovoltaicos, sobretudo em regiões semiáridas como o Nordeste brasileiro.

Os revestimentos contendo TiO_2 calcinado demonstram elevada atividade fotocatalítica e absortância seletiva, podendo contribuir também para a degradação de compostos orgânicos presentes no ar ou em superfícies urbanas, ampliando o espectro de aplicações desses materiais para além do setor solar.

Nesse contexto, a escolha adequada da técnica de deposição, o controle preciso da espessura dos filmes e a definição otimizada dos parâmetros de cura térmica configuram-se como aspectos decisivos para a eficiência funcional dos revestimentos. Tais fatores devem ser considerados em futuras investigações, que poderão incluir análises de durabilidade, exposição prolongada à radiação

UV e validação em condições reais de operação, visando a consolidação desses materiais como soluções viáveis e sustentáveis para a indústria fotovoltaica.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, R. S. de; LIMA, F. M.; GOMES, K. C. Propriedades ópticas de filmes finos de TiO_2 obtidos por sol-gel para aplicação em dispositivos solares. *Revista Matéria*, v. 26, n. 1, p. e12567, 2021.

BRINKER, C. J.; SCHERER, G. W. *Sol–Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol–Gel Processing*. Boston: Academic Press, 1990.

ÇAMURLU, H. E. et al. The effect of surface pollution on photovoltaic performance. *Solar Energy*, v. 83, n. 6, p. 1023–1028, 2009.

DARWISH, Z. A. et al. Impact of environmental conditions on PV performance in arid regions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 45, p. 407–415, 2015.

FARDO, F. D. Filmes finos de TiO_2 obtidos via sol-gel: aplicações e propriedades ópticas. *Revista de Materiais*, v. 24, n. 3, p. 123–129, 2019.

GAZOTTI, R. P.; ROCHA, A. F.; FERREIRA, L. C. Análise da molhabilidade em superfícies funcionais: aplicações em autolimpeza e antifog. *Polímeros*, v. 30, n. 1, p. e2020010, 2020.

GOMES, K. C.; SANTOS, L. R.; LACERDA, J. A. Revestimentos fotocatalíticos aplicados à energia solar: uma revisão crítica. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 12, n. 2, p. 345–359, 2023.

GONÇALVES, P. M. S. et al. Avaliação de superfícies autolimpantes aplicadas em módulos fotovoltaicos no semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Energia Solar*, v. 12, n. 1, p. 45–56, 2021.

IEA – International Energy Agency. *World Energy Outlook 2023*. Paris: IEA Publications, 2023.

JUNG, H. J. et al. Self-cleaning solar panels using hydrophilic coatings: field experiments and performance evaluation. *Renewable Energy*, v. 139, p. 757–764, 2019.

MEHDI, M. R. et al. Surface microstructuring of glass substrates via abrasive blasting for enhanced coating adhesion. *Applied Surface Science Advances*, v. 7, p. 100199, 2024.

OLIVEIRA, J. L.; NASCIMENTO, D. S.; SOARES, V. G. Curvas espectrais de transmitância e absortância em filmes finos de TiO_2: análise UV-Vis. *Cerâmica*, v. 69, n. 410, p. 145–153, 2023.

SALAMAH, S. A. et al. Assessment of dust impact on solar panel performance in different environments. *Energy Reports*, v. 8, p. 643–654, 2022.

SAYYAH, A.; HOSHMAND, N.; AMMAR, A. Performance loss of photovoltaic panels due to dust deposition: A review. *Solar Energy*, v. 107, p. 576–584, 2014.

SILVA, A. B.; SANTOS, D. A. Síntese de filmes de TiO_2 por sol-gel: influência dos parâmetros na morfologia e propriedades ópticas. *Revista Matéria*, v. 27, n. 2, p. e12578, 2022.

XAVIER, J. P. et al. Influência da calcinação na estrutura cristalina de filmes de TiO_2 aplicados a dispositivos solares. *Química Nova*, v. 45, n. 1, p. 89–95, 2022.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro e ao Laboratório de Síntese e Caracterização de Filmes Finos (LABFILM/UFPB) pela infraestrutura e suporte técnico durante a realização deste trabalho.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.