

Análise de Materiais Inovadores Empregados no Revestimento de Fachadas em prol da Descarbonização das Edificações

Maria Fernanda Pereira

Engenheira Civil e Mestranda em Ambiente Construído
Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil
mariafpereira2002@gmail.com
ORCID: 0009-0005-1673-357X

Mayara Carelli de Paula Costa

Engenheira Civil e Mestranda em Ambiente Construído
Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil
eng.mayaracarelli@gmail.com
ORCID: 0009-0009-0812-6007

Alexandra Pereira

Arquiteta e Mestranda em Ambiente Construído
Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil
alexandra.pereira@estudante.ufjf.br
ORCID: 0009-0002-1150-3853

Maria Teresa Gomes Barbosa

Professora Doutora em Engenharia Civil
Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil
teresa.barbosa@ufjf.br
ORCID: 0000-0002-3839-5728

Análise de Materiais Inovadores Empregados no Revestimento de Fachadas em prol da Descarbonização das Edificações

RESUMO

Objetivo - Investigar o potencial de soluções inovadoras passíveis de serem empregadas no revestimento das fachadas das edificações que visam a redução das emissões de CO₂ incorporadas nas edificações de concreto armado, considerando simultaneamente análise de ciclo de vida, desempenho térmico, durabilidade e comportamento em uso, objetivando confrontar os sistemas convencionais com os inovadores.

Metodologia - A pesquisa adota abordagem qualitativa, fundamentada em uma revisão crítica da literatura científica. Foi desenvolvido um modelo analítico composto por três eixos: (i) desempenho ambiental e de carbono ao longo do ciclo de vida; (ii) desempenho técnico-funcional; e (iii) viabilidade de aplicação e limitações práticas. Cada eixo foi subdividido em cinco critérios avaliativos, totalizando quinze critérios analisados de forma binária (Sim/Não), permitindo uma análise comparativa do potencial de descarbonização das soluções estudadas: tinta fotocatalítica, fachada verde, fachada ventilada e vidro preenchido com água.

Originalidade/relevância - O estudo preenche lacuna teórica em decorrência à ausência de abordagens integradas que articulem carbono incorporado, desempenho operacional, durabilidade e viabilidade tecno-prática em sistemas de fachada aplicados as edificações. Sendo assim, supera análises fragmentadas centradas exclusivamente em eficiência energética ou emissões isoladas, contribuindo para uma avaliação sistêmica orientada à descarbonização do ambiente construído.

Resultados - As fachadas verdes e as fachadas ventiladas foram classificadas como soluções de alto potencial de descarbonização, devido, principalmente, pela redução consistente da demanda energética operacional e pela robustez técnico-funcional. A tinta fotocatalítica apresentou um potencial intermediário, com benefícios ambientais diretos relacionados à melhoria da qualidade do ar, porém com limitações associadas à durabilidade e estabilidade ambiental. E, finalmente, o vidro preenchido com água demonstrou elevado desempenho termo energético e expressiva redução de emissões ao longo do ciclo de vida, entretanto, há restrições relacionadas à maturidade tecnológica, custo inicial e complexidade operacional.

Contribuições teóricas/metodológicas - O estudo propõe um modelo estruturado de avaliação qualitativa multicritério aplicável à comparação de sistemas de fachada sob a perspectiva da descarbonização. A metodologia desenvolvida possibilita análise clara, sistemática e replicável, integrando ciclo de vida, desempenho funcional e viabilidade prática, oferecendo instrumento de apoio à decisão projectual em contextos de retrofit e novos empreendimentos.

Contribuições sociais e ambientais - O estudo reforça o papel estratégico das fachadas na mitigação das emissões de carbono no setor da construção civil, contribuindo para a redução do consumo energético, melhoria do conforto térmico, qualidade do ar urbano e adaptação às mudanças climáticas. Por fim, são fornecidos subsídios técnicos para políticas públicas, práticas projectuais sustentáveis e transição para edificações de baixo carbono, alinhadas às metas globais de mitigação climática.

PALAVRAS-CHAVE: Sistemas de fachada de baixo carbono. Descarbonização de edificações. Sustentabilidade.

Analysis of Innovative Façade Cladding Materials for Building Decarbonization

ABSTRACT

Objective – To investigate the potential of innovative façade cladding solutions to reduce embodied CO₂ emissions in reinforced concrete buildings, considering life cycle assessment, thermal performance, durability, and in-use behavior, while comparing innovative systems with conventional façade solutions.

Methodology – The research adopts a qualitative approach based on a critical review of the scientific literature. An analytical framework was developed comprising three main dimensions: (i) environmental and carbon performance throughout the life cycle; (ii) technical and functional performance; and (iii) implementation feasibility and practical constraints. Each dimension was subdivided into five evaluation criteria, totaling fifteen criteria assessed using a binary approach (Yes/No), enabling a comparative analysis of the decarbonization potential of the studied solutions: photocatalytic paint, green façades, ventilated façades, and water-filled glass.

Originality/Relevance – This study addresses a theoretical gap in the literature related to the lack of integrated approaches that simultaneously consider embodied carbon, operational performance, durability, and

techno-practical feasibility in façade systems applied to buildings. By moving beyond fragmented analyses focused solely on energy efficiency or isolated emissions, the research contributes to a systemic evaluation aimed at the decarbonization of the built environment.

Results – Green façades and ventilated façades were classified as solutions with high decarbonization potential, mainly due to their consistent reduction of operational energy demand and strong technical-functional performance. Photocatalytic paint showed intermediate potential, offering direct environmental benefits associated with improved air quality but presenting limitations related to durability and environmental stability. Water-filled glass demonstrated high thermo-energetic performance and significant life-cycle emission reductions; however, its application is currently constrained by technological maturity, high initial costs, and operational complexity.

Theoretical/Methodological Contributions – The study proposes a structured qualitative multi-criteria assessment framework applicable to the comparison of façade systems from a decarbonization perspective. The developed methodology enables a clear, systematic, and replicable analysis by integrating life cycle considerations, functional performance, and practical feasibility, supporting design decision-making in both retrofit projects and new developments.

Social and Environmental Contributions – The findings reinforce the strategic role of façades in mitigating carbon emissions within the construction sector by contributing to reduced energy consumption, improved thermal comfort, enhanced urban air quality, and climate change adaptation. The study also provides technical insights to support public policies, sustainable design practices, and the transition toward low-carbon buildings aligned with global climate mitigation goals.

KEYWORDS: Low-carbon façade systems. Building decarbonization. Sustainability.

Análisis de Materiales Innovadores Aplicados al Revestimiento de Fachadas para la Descarbonización de las Edificaciones

RESUMEN

Objetivo – Investigar el potencial de soluciones innovadoras aplicables al revestimiento de fachadas con el fin de reducir las emisiones de CO₂ incorporadas en edificaciones de hormigón armado, considerando simultáneamente el análisis del ciclo de vida, el desempeño térmico, la durabilidad y el comportamiento en uso, con el objetivo de comparar los sistemas convencionales con los innovadores.

Metodología – La investigación adopta un enfoque cualitativo basado en una revisión crítica de la literatura científica. Se desarrolló un modelo analítico compuesto por tres ejes: (i) desempeño ambiental y de carbono a lo largo del ciclo de vida; (ii) desempeño técnico-funcional; y (iii) viabilidad de aplicación y limitaciones prácticas. Cada eje fue subdividido en cinco criterios de evaluación, totalizando quince criterios analizados de forma binaria (Sí/No), lo que permitió realizar un análisis comparativo del potencial de descarbonización de las soluciones estudiadas: pintura fotocatalítica, fachada verde, fachada ventilada y vidrio relleno de agua.

Originalidad/Relevancia – El estudio aborda una brecha teórica derivada de la ausencia de enfoques integrados que articulen el carbono incorporado, el desempeño operativo, la durabilidad y la viabilidad tecno-práctica en sistemas de fachada aplicados a edificaciones. De este modo, supera análisis fragmentados centrados exclusivamente en la eficiencia energética o en emisiones aisladas, contribuyendo a una evaluación sistémica orientada a la descarbonización del entorno construido.

Resultados – Las fachadas verdes y las fachadas ventiladas fueron clasificadas como soluciones de alto potencial de descarbonización, principalmente debido a la reducción consistente de la demanda energética operacional y a su robustez técnico-funcional. La pintura fotocatalítica presentó un potencial intermedio, con beneficios ambientales directos relacionados con la mejora de la calidad del aire, aunque con limitaciones asociadas a la durabilidad y estabilidad ambiental. Finalmente, el vidrio relleno de agua demostró un elevado desempeño termoenergético y una reducción significativa de emisiones a lo largo del ciclo de vida; sin embargo, presenta restricciones relacionadas con la madurez tecnológica, el costo inicial y la complejidad operativa.

Contribuciones Teóricas/Metodológicas – El estudio propone un modelo estructurado de evaluación cualitativa multicriterio aplicable a la comparación de sistemas de fachada desde la perspectiva de la descarbonización. La metodología desarrollada permite un análisis claro, sistemático y replicable, integrando el ciclo de vida, el desempeño

funcional y la viabilidad práctica, ofreciendo una herramienta de apoyo a la toma de decisiones proyectuales en contextos de rehabilitación (retrofit) y nuevas edificaciones.

Contribuciones Sociales y Ambientales – El estudio refuerza el papel estratégico de las fachadas en la mitigación de las emisiones de carbono en el sector de la construcción, contribuyendo a la reducción del consumo energético, a la mejora del confort térmico, a la calidad del aire urbano y a la adaptación al cambio climático. Finalmente, se aportan bases técnicas para el desarrollo de políticas públicas, prácticas proyectuales sostenibles y la transición hacia edificaciones de bajo carbono, alineadas con los objetivos globales de mitigación climática.

PALABRAS CLAVE: Sistemas de fachada de bajo carbono. Descarbonización de edificaciones. Sostenibilidad.

RESUMO GRÁFICO



1 INTRODUÇÃO

O crescimento contínuo das emissões globais de dióxido de carbono constitui um dos principais desafios ambientais atualmente, estando diretamente associado às mudanças climáticas. Nesse contexto, o setor da construção civil destaca-se como um dos maiores responsáveis pelos impactos ambientais, em razão de sua elevada demanda energética tornando necessário abordagens sistêmicas e integradas para a avaliação do desempenho ambiental dos edifícios (Alabdulrazzaq et al., 2025; Štompf et al., 2025).

Nesse sentido, as fachadas das edificações assumem papel estratégico por constituir a principal interface entre os ambientes interno e externo, influenciando diretamente o comportamento térmico, a iluminação natural, a ventilação e, conseqüentemente, o consumo energético (Tahmasbi et al., 2025) já que podem contribuir cerca de 10% a 30% para a redução das emissões totais de carbono incorporado através da minimização do emprego de sistemas ativos de climatização e iluminação artificial (Alabdulrazzaq et al., 2025).

A necessidade de mitigar as emissões de CO₂ no setor da construção civil, aliada à elevada pegada ambiental e à durabilidade limitada dos revestimentos convencionais, tem impulsionado a investigação de soluções de fachada mais eficientes e tecnológicas. No contexto brasileiro, onde o concreto armado constitui o sistema construtivo mais amplamente empregado, os revestimentos associados a esse sistema assumem papel estratégico, uma vez que influenciam diretamente o desempenho térmico, a eficiência energética e a vida útil das edificações. (Kraft et al., 2022; Li et al., 2025).

Nesse contexto, este estudo parte da hipótese de que soluções inovadoras a serem empregadas no revestimento de fachadas apresentam potencial significativo para a redução das emissões de CO₂ incorporadas nas edificações, sobretudo quando associadas a maior durabilidade, melhor desempenho térmico e comportamento satisfatório ao longo da vida útil, em comparação aos convencionais.

Sendo assim, o objetivo geral desta pesquisa é investigar o potencial de soluções inovadoras de revestimento de fachadas na redução das emissões de CO₂ incorporadas em edificações de concreto armado, considerando a análise do ciclo de vida dos materiais, bem como aspectos de desempenho, durabilidade e uso. Especificamente, pretende-se: (i) mapear e descrever soluções inovadoras de revestimento de fachadas com potencial de baixo carbono, a saber: tinta fotocatalítica, fachada verde, fachada ventilada e vidro preenchido com água; (ii) avaliar de forma integrada as emissões de CO₂ incorporadas, o desempenho térmico, o comportamento em uso e a durabilidade dos revestimentos inovadores; e (iii) comparar o desempenho ambiental desses materiais aos convencionais, identificando aqueles com maior potencial de descarbonização.

Finalmente, este estudo se destaca por avaliar de forma integrada o potencial de materiais inovadores aplicados a fachadas de edificações, considerando simultaneamente a redução das emissões incorporadas, o comportamento em fase de uso e a longevidade dos sistemas. Ao abordar lacunas ainda presentes na literatura, a pesquisa oferece subsídios técnicos para decisões projetuais mais sustentáveis e contribui para a consolidação de estratégias eficazes de descarbonização, alinhadas às metas globais de mitigação de carbono e à transição do ambiente construído para um cenário de baixo impacto ambiental.

2 MATERIAIS INOVADORES DE BAIXO CARBONO PARA DESCARBONIZAÇÃO DAS FACHADAS

2.1 Tinta Fotocatalítica

O emprego de nanomateriais na construção civil tem sido apontado como uma estratégia promissora para a melhoria do desempenho ambiental das edificações. Nesse contexto, a tinta fotocatalítica destaca-se como um revestimento funcional obtido a partir da incorporação de fotocatalisadores, especialmente pela adição de nanopartículas de dióxido de titânio (TiO_2), capazes de conferir novas funcionalidades às superfícies construídas (Bersch et al., 2023; Rosset et al., 2021), como: propriedades autolimpantes, elevada estabilidade química, ação antimicrobiana e capacidade despoluente aos materiais de construção, contribuindo para a purificação do ar em ambientes urbanos (Fregni; Venturi; Franzoni, 2023; Salvadores et al., 2020; Bersch et al., 2023).

Os materiais de construção fotocatalíticos constituem uma tecnologia ambientalmente sustentável, pois promovem a oxidação de poluentes atmosféricos por meio da ação do TiO_2 , que favorece a redução de contaminantes como óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO_2) e compostos orgânicos voláteis (COVs), contribuindo para a melhoria da qualidade do ar *in situ* em áreas contaminadas e podendo ser aplicados tanto em ambientes internos quanto externos, em materiais como concreto, asfalto, revestimentos cerâmicos e tintas (Salvadores et al., 2020; Karagkounis et al., 2023).

Resultados experimentais demonstram que superfícies revestidas com tintas contendo nanopartículas de TiO_2 apresentam taxas de degradação de COVs significativamente superiores às observadas em tintas convencionais, alcançando valores até 60 vezes maiores no caso do xileno, o que evidencia o elevado potencial dessas tintas para aplicação em edificações (Rosset et al., 2021).

No contexto das fachadas de edifícios, a aplicação do TiO_2 atende não apenas a objetivos ambientais, mas também estéticos, uma vez que a exposição à poluição urbana favorece o acúmulo de partículas atmosféricas nas superfícies do revestimento. Assim, essas tintas são empregadas, principalmente, em ambientes externos, como fachadas, com o intuito de reduzir o acúmulo de sujeira e manter as superfícies dos edifícios limpas, beneficiando-se das propriedades: elevada molhabilidade, superfície hidrofílica e autolimpeza (Bersch et al., 2023).

Entretanto, podem oferecer riscos envolvem tanto a exposição aos nanos objetos, podendo afetar a saúde humana e o meio ambiente, quanto à formação de produtos derivados da irradiação UV das tintas, incluindo compostos carbonílicos e ácido nitroso (Rosset et al., 2021). A durabilidade desses materiais também é objeto de estudo, uma vez que os revestimentos finos à base de TiO_2 aplicados em argamassas podem sofrer erosão da superfície e degradação por agentes ambientais, enquanto os componentes orgânicos do aglutinante podem se decompor sob exposição prolongada à luz UV, formando compostos estáveis como acetaldeídos, cetonas e carbonilas, que não se mineralizam completamente (Bersch et al., 2023). Fatores externos adicionais, como o acúmulo de contaminantes em superfícies horizontais, a remoção parcial do TiO_2 pela ação da chuva e a lixiviação de nanopartículas da matriz da tinta durante longos períodos de exposição UV, podem reduzir a eficiência do produto, reforçando a necessidade de uma avaliação cuidadosa dos efeitos ambientais desses materiais (Fregni; Venturi; Franzoni, 2023).

Do ponto de vista ambiental, com base na Análise de Ciclo de Vida (ACV) estudada por Karagkounis et al. (2023), o uso de tintas fotocatalíticas apresenta melhor desempenho ambiental global, pois podem reduzir o consumo de energia relacionado à ventilação e melhorar a qualidade do ar interno.

2.2 Fachada Verde

As fachadas verdes caracterizam-se pelo uso de plantas dispostas diretamente no solo na base do edifício, denominadas fachadas verdes diretas, ou em vasos distribuídos ao longo da fachada, conhecidas como fachadas verdes indiretas, configurando-se como uma solução flexível e adaptável ao design ambiental. Nas fachadas verdes diretas, plantas trepadeiras autocolantes, enraizadas no solo, podem crescer diretamente sobre a superfície da parede, dispensando estruturas de suporte adicionais. Já as indiretas, plantas trepadeiras ou pendentes são sustentadas por elementos estruturais independentes, como treliças, hastes metálicas ou cabos, posicionados a certa distância da parede, criando uma cavidade de ar entre o revestimento vegetal e o envelope do edifício (Blanco et al., 2021; Bakhshoodeh; Ocampo; Oldham, 2022; Alothman; Abdin; Mahmoud, 2022).

Esses sistemas utilizam uma ampla variedade de espécies vegetais e a irrigação pode ocorrer por precipitação natural, de forma manual ou por sistemas automatizados (Alothman; Abdin; Mahmoud, 2022). Embora as fachadas verdes diretas representem uma solução de baixo custo e reduzida complexidade construtiva, sua aplicação pode ocasionar danos a superfícies previamente fissuradas e apresenta limitações quanto à altura máxima atingível pelas trepadeiras, geralmente restrita a cerca de 25 m, além de demandar longos períodos para o crescimento (Blanco et al., 2021).

As paredes vivas, por sua vez, baseiam-se na utilização de substratos de crescimento fixados verticalmente ao envelope da edificação, empregando plantas enraizadas em sistemas modulares pré-fabricados e frequentemente pré-vegetados antes da instalação. Soluções hidropônicas são amplamente adotadas, utilizando camadas têxteis para suporte radicular, instaladas sobre painéis rígidos, geralmente de PVC, que são fixados a estruturas de suporte em alumínio ancoradas à fachada externa (Blanco et al., 2021; Bakhshoodeh; Ocampo; Oldham, 2022).

Além dos benefícios em escala edilícia, os sistemas verticais vegetados podem gerar impactos ambientais positivos em escala urbana, incluindo a mitigação do efeito de ilha de calor, o incremento da biodiversidade, a melhoria da qualidade do ar, o aumento do isolamento acústico proporcionado pela massa foliar e a promoção do bem-estar social e psicológico dos usuários e da população urbana (Ottelé; Perini; Haas, 2014).

De modo geral, o desempenho ambiental dos sistemas verticais vegetados é influenciado por múltiplos fatores, incluindo o tipo de sistema, a orientação da fachada, a largura da cavidade de ar, as condições climáticas locais, o índice de área foliar, as espécies vegetais selecionadas e as características construtivas da edificação. Seus principais benefícios abrangem dimensões ambientais, econômicas e sociais, destacando-se a redução das emissões de gases de efeito estufa, a adaptação às mudanças climáticas, a melhoria da qualidade do ar, a economia de energia por isolamento térmico, a provisão de habitats urbanos, a valorização estética e a atenuação do ruído urbano (Blanco et al., 2021; Bakhshoodeh; Ocampo; Oldham, 2022; Ottelé; Perini; Haas, 2014).

Evidências empíricas recentes confirmam o potencial das fachadas verdes para a redução do consumo energético e das emissões associadas ao ambiente construído em diferentes contextos climáticos. Bakhshoodeh, Ocampo e Oldham (2022) demonstram que, tanto em climas quentes quanto frios, a temperatura do espaço de ar em fachadas vegetadas apresenta comportamento amortecido em relação ao ar ambiente, sendo em média $1,3 \pm 1,1$ °C inferior durante períodos quentes e $0,1 \pm 0,6$ °C superior em períodos frios.

Perini et al. (2021) demonstram que fachadas verdes diretas são consistentemente sustentáveis por dispensarem materiais adicionais, enquanto o desempenho das fachadas indiretas depende fortemente dos sistemas de suporte empregados. No clima mediterrâneo, a economia de energia, que pode alcançar até 16% ao longo de 50 anos, mostrou-se suficiente para compensar os impactos ambientais iniciais, com ponto de equilíbrio ambiental atingido cerca de cinco anos após a instalação. A fase de uso foi identificada como a mais impactante, sobretudo em função do consumo energético e hídrico, embora estratégias de eficiência energética, seleção adequada de materiais e incentivos econômicos possam antecipar o retorno ambiental e financeiro dos sistemas verticais vegetados.

2.3 Fachada Ventilada

As fachadas ventiladas destacam-se como uma solução tecnicamente consolidada, caracterizado pela presença de uma cavidade de ar ventilada entre o revestimento externo e a camada interna do envelope, sendo o revestimento fixado à parede por meio de subestruturas e ancoragens mecânicas, sendo denominadas de fachadas ventiladas opacas (OVF) quando constituídas por camadas opacas (Schabowicz; Zawíslak, 2020; Goulart; Labaki, 2022; Pizzatto et al., 2025). As OVFs têm apresentado crescente aplicação em diferentes tipologias, climas e configurações projectuais, especialmente em regiões com verões quentes e invernos amenos, em função da absorção e reflexão da radiação solar, ao mesmo tempo em que a ventilação da cavidade reduz a transferência direta de calor para o interior da edificação (Pujadas-Gispert et al., 2020; Qurraie; Bakirhan, 2023).

O principal benefício das fachadas ventiladas opacas reside na sua capacidade de mitigar os ganhos térmicos em climas quentes, promovendo melhorias significativas no conforto térmico interno e reduzindo a demanda por sistemas de climatização artificial, devido ao desempenho superior do envelope em termos térmicos, energéticos e acústicos (Gregório-Atem et al., 2020; Pizzatto et al., 2025).

O princípio fundamental de funcionamento consiste na dissipação do calor gerado pela incidência da radiação solar por meio do efeito chaminé estabelecido na cavidade ventilada, que ocorre quando o revestimento externo absorve a radiação solar direta, elevando a temperatura do ar na cavidade, que passa a se mover por convecção natural. A combinação entre as forças induzidas pelo vento e a fluabilidade térmica, resultante das diferenças de temperatura e densidade do ar, promove um fluxo ascendente que expulsa o ar aquecido para o exterior da fachada, permitindo simultaneamente a entrada de ar mais frio, estabelecendo uma ventilação natural eficiente e reduzindo a transferência de calor para o interior da edificação. Adicionalmente, a camada interna do sistema atua como uma barreira isolante, contribuindo para o desempenho térmico e acústico do edifício (Pizzatto et al., 2025; Pujadas-Gispert et al., 2020).

As fachadas ventiladas têm se mostrado altamente compatíveis com as demandas atuais de desempenho térmico e conforto ambiental nos edifícios, podendo ser adotadas tanto em regiões de clima quente quanto em contextos de clima moderado (Schabowicz; Zawislak, 2020). Para além do efeito estético, esse sistema contribui para a melhoria do desempenho térmico e acústico da edificação, o aumento da eficiência energética e a redução da demanda por energia, refletindo diretamente no conforto dos usuários (Pizzatto et al., 2025; Qurraie; Bakirhan, 2023). Do ponto de vista ambiental, estudos indicam que as fachadas ventiladas podem proporcionar reduções nas emissões de CO₂ entre aproximadamente 23% e 33%, com períodos de retorno estimados entre 8 e 20 anos, evidenciando sua viabilidade técnica e ambiental como estratégia de descarbonização (Qurraie; Bakirhan, 2023).

Além dos benefícios térmicos e energéticos, as fachadas ventiladas apresentam vantagens arquitetônicas e construtivas relevantes, já que a flexibilidade e adaptabilidade favorecem sua aplicação em edifícios novos e em processos de reabilitação, enquanto a construção a seco e a facilidade de manutenção tornam o sistema competitivo em comparação com fachadas convencionais, especialmente em contextos de retrofit (Pizzatto et al., 2025).

2.4 Vidro Preenchido com Água (VPA)

Vidro Preenchido com Água (VPA) é uma tecnologia aplicável a fachadas transparentes e translúcidas, tanto em novas edificações quanto em intervenções de retrofit, com o objetivo de aprimorar a gestão energética, a absorção térmica e o aproveitamento de energia renovável, contribuindo para a redução do consumo energético e a melhoria do conforto térmico e do desempenho acústico dos edifícios (Santamaria et al., 2020a; 2020c; 2021).

O sistema atua por meio da modificação do comportamento térmico dos envelopes envidraçados, utilizando a circulação de água na cavidade entre duas lâminas de vidro em unidades de vidro isolado. A água absorve grande parte da radiação solar infravermelha, enquanto o componente visível é transmitido para o interior, preservando a transparência do vidro e controlando a temperatura superficial por meio da circulação hidráulica, o que resulta em condições térmicas internas mais estáveis (Santamaria et al., 2020b; 2021; Gutai et al., 2024).

O sistema é composto por três elementos principais: uma estrutura de alumínio extrudado, responsável pela estabilidade estrutural; o conjunto envidraçado; e o sistema de circulação hidráulica. O vidro consiste em múltiplas camadas de vidro laminado combinadas com revestimentos funcionais e interlayers de polivinil butiral, cujas propriedades térmicas e espectrais, associadas a uma vazão mássica variável de água, permitem a absorção seletiva da radiação solar infravermelha, embora com custo inicial superior ao de sistemas convencionais de vidro duplo ou triplo (Santamaria et al., 2020a; 2021). A circulação de água ocorre em circuito fechado por meio de bomba, trocador de calor e sensores de temperatura e vazão, possibilitando o controle térmico do sistema. A água absorve a maior parte da radiação infravermelha incidente, enquanto uma fração significativa da radiação visível atravessa o vidro, preservando a transparência óptica. A energia térmica capturada pode ser transportada e armazenada, permitindo sua utilização em sistemas de aquecimento hidrônico ou como coletor solar integrado para aquecimento de água, com possibilidade de armazenamento do excedente

térmico (Santamaria et al., 2020a; 2021). Dessa forma, o VPA promove economia energética sem comprometer a transparência das superfícies envidraçadas (Gutai; Kheybari, 2020).

Sendo assim, o VPA pode atuar simultaneamente como envelope de alto desempenho e como componente ativo dos sistemas de aquecimento e resfriamento, contribuindo para a melhoria do coeficiente de desempenho dos sistemas de climatização ao influenciar a temperatura do ar interno, reduzir a temperatura média radiante e, conseqüentemente, a temperatura operacional, ampliando o conforto térmico dos ambientes (Santamaria et al., 2020b; 2020c; 2021).

O desempenho do VPA é fortemente dependente das condições climáticas. Em climas quentes, o controle da radiação solar assume papel central, sendo o fluxo do fluido mais determinante para a transmissão térmica associada à radiação do que para a condução térmica convencional. O sistema apresenta bom desempenho tanto em condições de verão quanto de inverno, com resultados geralmente mais favoráveis no inverno, quando a camada de água potencializa o ganho solar com impacto limitado na transmissão térmica. O ângulo de incidência solar também exerce influência significativa, sobretudo em situações de alta radiação (Gutai; Kheybari, 2020).

A redução da demanda por resfriamento decorrente da absorção térmica caracteriza a economia direta de energia, enquanto a reutilização da energia capturada para aquecimento configura economia indireta, ampliando o potencial de eficiência energética do sistema (Gutai; Kheybari, 2020). Entretanto, sua aplicação exige atenção a aspectos técnicos específicos, como riscos de corrosão e poluição das superfícies internas, uma vez que a cavidade interna não é vedada, mas integrada ao sistema hidráulico. Como não há acesso para limpeza interna, o sistema requer filtragem adequada (Gutai; Kheybari, 2020; Gutai et al., 2020).

Santamaria et al. (2021) demonstram que, ao longo de uma vida útil de 50 anos, sistemas de Vidro Preenchido com Água apresentam custo inicial substancialmente superior aos sistemas convencionais. Contudo, quando considerados os custos totais do ciclo de vida, os sistemas VPA mostram-se economicamente competitivos, com custos globais entre 85% e 92% daqueles observados em sistemas tradicionais. Do ponto de vista ambiental, os resultados indicam reduções expressivas ao longo do ciclo de vida, com economia de energia variando entre 36% e 66% e redução das emissões de CO₂ situada entre 30% e 70%.

Santamaria et al. (2020a) analisaram o desempenho termoenergético e ambiental de fachadas com VPA, demonstrando elevada capacidade de controle térmico dinâmico. Apesar de seu potencial, o sistema Vidro Preenchido com Água (VPA) apresenta limitações técnicas e operacionais relevantes. Observa-se baixa interoperabilidade com outros sistemas prediais, especialmente com a ventilação, o que dificulta sua integração em edificações contemporâneas. Outro entrave significativo refere-se ao elevado custo inicial de implantação, associado à necessidade de sistemas integrados de gerenciamento de energia. Por fim, a difusão do VPA depende de maior padronização nos processos de fabricação e implantação, visando à redução dos custos iniciais e dos períodos de retorno, além da integração com sistemas de ventilação eficientes para o controle da umidade relativa interna (Santamaria et al., 2020b; Santamaria et al., 2021).

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa adota uma abordagem qualitativa estruturada para avaliar o potencial de descarbonização de soluções inovadoras de fachada aplicadas a edificações em concreto armado, com base na análise crítica da literatura. Considera-se que, à medida que a eficiência energética operacional dos edifícios é aprimorada, o papel dos materiais e sistemas de fachada torna-se determinante para a redução das emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida, exigindo métodos de avaliação que integrem desempenho ambiental, técnico e viabilidade de aplicação. A análise foi estruturada em três eixos analíticos complementares, sendo cada eixo composto por cinco critérios avaliativos.

O primeiro eixo concentra-se no desempenho ambiental e de carbono ao longo do ciclo de vida, foram considerados os seguintes critérios: i) redução do consumo energético operacional, que verifica se a solução contribui para a diminuição da demanda energética durante a fase de uso do edifício, por meio de estratégias passivas, controle térmico ou melhoria do envelope; ii) emissões de CO₂ no ciclo de vida, que avalia evidências de menor carbono incorporado ou melhor desempenho ambiental em análises de ciclo de vida, considerando produção, aplicação, manutenção e fim de vida; iii) impactos ambientais positivos diretos, que analisa benefícios ambientais associados diretamente ao uso da solução, como redução de poluentes atmosféricos, melhoria da qualidade do ar ou mitigação do efeito de ilha de calor; iv) estabilidade ambiental ao longo da vida útil, que considera a permanência e consistência do desempenho ambiental ao longo do tempo, mesmo sob condições de envelhecimento, exposição climática e uso contínuo; v) externalidades ambientais indiretas, que avalia benefícios ambientais adicionais não diretamente relacionados ao desempenho térmico, como efeitos fotocatalíticos, potencial de sequestro de carbono, redução de intervenções futuras ou prolongamento da vida útil dos sistemas construtivos.

O segundo eixo 2 aborda o desempenho técnico e funcional concentrou-se nos seguintes critérios: i) eficiência térmica do sistema, que examina a contribuição da solução para o conforto térmico e para a melhoria do desempenho energético do envelope; ii) durabilidade física do material, que avalia a resistência ao envelhecimento, degradação e perda de propriedades ao longo do tempo; iii) adaptabilidade às condições climáticas, que considera a capacidade de desempenho satisfatório sob diferentes contextos climáticos, orientações solares e regimes de exposição ambiental; iv) compatibilidade com intervenções de retrofit, que analisa a viabilidade técnica de aplicação em edificações existentes, sem necessidade de alterações estruturais significativas; v) confiabilidade de desempenho em uso, que avalia o grau de previsibilidade do funcionamento da solução, a dependência de controle técnico contínuo e o risco de falhas operacionais que possam comprometer seus benefícios.

O terceiro eixo avalia a viabilidade de aplicação e limitações práticas foi estruturado a partir de: i) maturidade tecnológica, que considera o nível de desenvolvimento, validação científica e consolidação da solução no setor da construção; ii) relação custo-benefício ao longo do ciclo de vida, que analisa a compatibilidade entre custos iniciais, manutenção e benefícios ambientais e funcionais; iii) facilidade e eficiência de manutenção, que avalia a eficiência da solução quanto à facilidade de operação, previsibilidade das intervenções, racionalização de custos e necessidade de especialização técnica; iv) conformidade técnica e ambiental, que verifica o nível de conformidade da solução com requisitos de segurança, desempenho funcional, compatibilidade ambiental e condições específicas de aplicação; v) potencial de

replicabilidade, que considera a viabilidade de adoção em larga escala, incluindo disponibilidade de materiais, mão de obra e compatibilidade com práticas construtivas consolidadas.

Cada critério foi avaliado de forma binária (Sim/Não), com base na presença ou ausência de evidências consistentes na literatura analisada. A partir da soma dos critérios atendidos, as soluções foram classificadas quanto ao seu potencial de descarbonização, sendo consideradas de alto potencial aquelas que atenderam de 10 a 15 critérios no total, de potencial intermediário as que atenderam de 5 a 10 critérios, e de potencial limitado aquelas que atenderam de 0 a 5 critérios. A classificação qualitativa foi derivada de evidências recorrentes reportadas na literatura, e não de medições experimentais diretas. O método adotado possibilita uma análise clara, sistemática e comparável entre diferentes soluções inovadoras de fachada, apoiando a tomada de decisão projetual orientada à mitigação das emissões de carbono.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

O Quadro 1 apresenta a aplicação da metodologia qualitativa proposta às soluções inovadoras de fachada analisadas, considerando os três eixos de avaliação: (i) desempenho ambiental e de carbono ao longo do ciclo de vida, (ii) desempenho técnico-funcional e (iii) viabilidade de aplicação e limitações práticas. Cada critério foi avaliado de forma binária (Yes/No), com base nas evidências apresentadas na literatura científica analisada. Os resultados evidenciam que as soluções avaliadas apresentam desempenhos distintos quanto ao seu potencial de descarbonização, refletindo diferenças significativas em termos de benefícios ambientais, robustez técnica e viabilidade prática ao longo do ciclo de vida.

Quadro 1 - Avaliação qualitativa do potencial de descarbonização das soluções de fachada

Eixo 1 – Desempenho ambiental e de carbono	Tinta fotocatalítica	Fachada verde	Fachada ventilada	Vidro Preenchido com Água
Redução do consumo energético operacional	Sim	Sim	Sim	Sim
Redução de emissões de CO ₂ no ciclo de vida	Sim	Sim	Sim	Sim
Impactos ambientais positivos diretos	Sim	Sim	Não	Não
Estabilidade ambiental ao longo da vida útil	Não	Sim	Sim	Sim
Externalidades ambientais indiretas	Sim	Sim	Não	Sim
Subtotal Eixo 1	4	5	3	4
Eixo 2 – Desempenho técnico-funcional	Tinta fotocatalítica	Fachada verde	Fachada ventilada	Vidro Preenchido com Água
Eficiência térmica do sistema	Não	Sim	Sim	Sim
Durabilidade física do material	Não	Sim	Sim	Sim
Adaptabilidade climática	Sim	Sim	Sim	Sim
Compatibilidade com retrofit	Sim	Sim	Sim	Sim
Confiabilidade do desempenho em uso	Não	Sim	Sim	Não
Subtotal Eixo 2	2	5	5	4
Eixo 3 – Viabilidade e limitações práticas	Tinta fotocatalítica	Fachada verde	Fachada ventilada	Vidro Preenchido com Água
Maturidade tecnológica	Sim	Sim	Sim	Não
Relação custo–benefício no ciclo de vida	Sim	Sim	Sim	Sim
Facilidade e eficiência de manutenção	Não	Não	Sim	Não
Conformidade técnica e ambiental	Sim	Sim	Sim	Sim
Potencial de replicabilidade	Sim	Sim	Sim	Não
Subtotal Eixo 3	4	4	5	2

Total de critérios atendidos (15)	10	14	13	10
Classificação final	Intermediário	Alto	Alto	Intermediário

Fonte: As autoras (2026).

Analisando o Quadro 1 verifica-se que a tinta fotocatalítica apresentou desempenho positivo sobretudo no Eixo 1, destacando-se pela capacidade de gerar impactos ambientais diretos, como a degradação de poluentes atmosféricos (NO_x, COVs e SO₂), e por externalidades ambientais indiretas relacionadas à melhoria da qualidade do ar urbano. Estudos indicam que, apesar do maior impacto associado à produção do TiO₂, os benefícios obtidos na fase de uso podem resultar em melhor desempenho ambiental global ao longo do ciclo de vida. Entretanto, limitações relevantes foram identificadas nos Eixos 2 e 3, particularmente no que se refere à durabilidade física, à confiabilidade do desempenho em uso e à estabilidade ambiental de longo prazo. A degradação do ligante polimérico, a erosão superficial, a lixiviação de nanopartículas e a formação de subprodutos potencialmente nocivos sob irradiação UV comprometem a previsibilidade do desempenho ao longo do tempo. Assim, embora apresente benefícios ambientais relevantes, a tinta fotocatalítica atendeu a nove critérios, sendo classificada como de potencial intermediário de descarbonização, sobretudo por depender fortemente de condições específicas de aplicação, manutenção e controle ambiental.

As fachadas verdes apresentaram o melhor desempenho global, atendendo a quatorze dos quinze critérios avaliados. No Eixo 1, destacam-se pela redução consistente do consumo energético operacional, pela mitigação das emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida e pela ampla gama de impactos ambientais positivos diretos e indiretos, incluindo sombreamento, evapotranspiração, sequestro de carbono, melhoria da qualidade do ar, mitigação do efeito de ilha de calor e incremento da biodiversidade urbana. No Eixo 2, os sistemas vegetados demonstraram elevada eficiência térmica, boa durabilidade quando adequadamente projetados e alta adaptabilidade climática, com desempenho comprovado em diferentes contextos climáticos. A confiabilidade do desempenho em uso é reforçada pela natureza passiva do sistema, sobretudo nas fachadas verdes diretas e indiretas de menor complexidade tecnológica. Apesar da maior complexidade de manutenção associada a sistemas mais sofisticados, como paredes vivas, os estudos indicam que estratégias de ecodesign, seleção criteriosa de materiais de suporte e otimização da irrigação permitem alcançar equilíbrio ambiental ao longo da vida útil. Dessa forma, as fachadas verdes foram classificadas como de alto potencial de descarbonização, constituindo uma solução multifuncional para a mitigação de emissões no ambiente construído.

As fachadas ventiladas também apresentaram desempenho elevado, atendendo a treze critérios, com destaque para os Eixos 2 e 3. Do ponto de vista técnico-funcional, o sistema demonstrou elevada eficiência térmica, durabilidade, confiabilidade operacional e ampla adaptabilidade climática, sendo eficaz tanto em climas quentes quanto moderados. A redução da demanda por climatização artificial, associada ao efeito chaminé na cavidade ventilada, resulta em economias energéticas expressivas e reduções significativas das emissões de CO₂ operacional. No Eixo 1, embora não apresente impactos ambientais diretos ou externalidades ambientais adicionais comparáveis às fachadas verdes ou às tintas fotocatalíticas, os ganhos energéticos e a redução consistente das emissões ao longo do ciclo de vida sustentam seu enquadramento como solução de alto desempenho ambiental. Adicionalmente, a maturidade tecnológica, a facilidade de aplicação em retrofit e a possibilidade de integração com sistemas

fotovoltaicos reforçam sua viabilidade prática. Assim, as fachadas ventiladas foram classificadas como de alto potencial de descarbonização, especialmente quando combinadas a estratégias de projeto orientadas à eficiência energética.

O Vidro Preenchido com Água apresentou desempenho expressivo nos Eixos 1 e 2, com reduções significativas do consumo energético operacional e das emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida, conforme evidenciado por estudos experimentais e simulações. O sistema demonstrou elevada eficiência térmica dinâmica, adaptabilidade climática e potencial para integrar funções de envelope, sombreamento e geração de energia térmica renovável. Entretanto, limitações relevantes foram identificadas no Eixo 3, particularmente no que se refere à maturidade tecnológica, à complexidade de manutenção, à replicabilidade em larga escala e à confiabilidade operacional, em razão da elevada complexidade do sistema hidráulico, do alto custo inicial e da dependência de sistemas avançados de controle e monitoramento. Além disso, o desempenho do VPA é fortemente dependente do clima e da correta integração com sistemas de ventilação e climatização, o que pode restringir sua aplicabilidade em determinados contextos. Dessa forma, embora o VPA apresente um dos maiores potenciais de redução simultânea de carbono operacional e incorporado, as restrições técnicas e operacionais atuais justificam sua classificação como solução de potencial intermediário de descarbonização, com elevada relevância estratégica em projetos específicos e perspectivas promissoras.

5 CONCLUSÕES

Os resultados da análise crítica da literatura confirmam a hipótese de que soluções inovadoras de revestimento de fachadas apresentam potencial relevante para a redução das emissões de CO₂ em edificações de concreto armado, desde que avaliadas sob uma perspectiva integrada de ciclo de vida, desempenho térmico, durabilidade e comportamento em uso. A revisão da literatura evidencia que os sistemas de fachadas das edificações configuram como elementos-chave na descarbonização de edificações, na medida em que influenciam de forma integrada o desempenho térmico, a demanda energética operacional e, em soluções inovadoras, o balanço de emissões de CO₂ incorporadas ao longo do ciclo de vida.

As tecnologias analisadas apresentam desempenhos ambientais distintos e fortemente dependentes do contexto de aplicação. As fachadas verdes e as fachadas ventiladas demonstram elevado potencial de descarbonização, sobretudo pela redução consistente da demanda energética operacional, pela melhoria do conforto térmico e pela contribuição positiva ao longo da vida útil, ainda que condicionadas à escolha criteriosa de materiais, à orientação da fachada e às condições climáticas locais. As tintas fotocatalíticas revelam benefícios ambientais diretos e indiretos, especialmente na melhoria da qualidade do ar urbano e na redução de custos de manutenção, porém seu impacto na descarbonização global é limitado por incertezas associadas à durabilidade, à estabilidade ambiental e aos impactos da produção de nanopartículas. O sistema Vidro Preenchido com Água destaca-se como uma solução promissora para fachadas transparentes, apresentando reduções expressivas de energia e emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida; contudo, sua ampla adoção ainda é restringida pela elevada complexidade técnica, pelo alto custo inicial e pela necessidade de integração avançada com sistemas prediais e estratégias de controle.

Do ponto de vista metodológico, a abordagem proposta, estruturada em eixos analíticos complementares, mostrou-se adequada para comparar soluções heterogêneas de fachada sob critérios ambientais e técnicos consistentes, superando análises fragmentadas centradas exclusivamente no desempenho energético ou no carbono incorporado. Ao integrar aspectos de ciclo de vida, desempenho funcional e viabilidade de aplicação, o estudo contribui para a sistematização do conhecimento existente e oferece subsídios técnicos para decisões projetuais mais robustas, especialmente em contextos de retrofit e de transição para edifícios de baixo carbono. Por fim, os resultados reforçam a necessidade de que estratégias de descarbonização no setor da construção avancem para além da eficiência operacional, incorporando avaliações dinâmicas de ciclo de vida e priorizando soluções de fachada que conciliem redução de emissões, durabilidade e adaptabilidade climática, em consonância com as metas globais de mitigação das mudanças climáticas.

AGRADECIMENTOS

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

FAPEMIG – Fundação de Amparo do Estado de Minas Gerais (BDT-0007/25).

UFJF – Universidade Federal de Juiz de Fora

REFERÊNCIAS

ALABDULRAZZAQ, H. et al. A framework for circular facade design: systematic review of design strategies and performance indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 536, e147140, 2025. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.147140.

ALOTHMAN, R. A. T.; ABDIN, A. R.; MAHMOUD, A. H. The effect of using vegetated façades on CO₂ emissions in multistory residential buildings, in cold semiarid and hot arid climate. In: VISIONS FOR FUTURE CITIES (VFC-2022). **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, Bristol: IOP Publishing, v. 1113, n. 1, e012020, 2022. DOI: 10.1088/1755-1315/1113/1/012020.

BAKHSHOODEH, R.; OCAMPO, C.; OLDHAM, C. Impact of ambient air temperature, orientation, and plant status on the thermal performance of green façades. **SSRN Electronic Journal**, 2022. DOI: 10.2139/ssrn.4278336.

BERSCH, J. D. et al. Photocatalytic TiO₂-based coatings for mortars on facades: a review of efficiency, durability, and sustainability. **Buildings**, v. 13, n. 1, p. 186, 2023. DOI: 10.3390/buildings13010186.

BLANCO, I. et al. Assessment of the environmental loads of green façades in buildings: a comparison with un-vegetated exterior walls. **Journal of Environmental Management**, v. 294, e112927, 2021. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112927.

FREGNI, A.; VENTURI, L.; FRANZONI, E. Evaluation of the performance and durability of self-cleaning treatments based on TiO₂ nanoparticles applied to cement-based renders and boards. **Coatings**, v. 13, p. 990, 2023. DOI: 10.3390/coatings13060990.

GOULART, M. F.; LABAKI, L. C. Thermal performance of opaque ventilated facades: a systematic review. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 13, e022026, 2022. DOI: 10.20396/parc.v13i00.8667308.

GREGÓRIO-ATEM, C. et al. Opaque ventilated façade (OVF) thermal performance simulation for office buildings in Brazil. **Sustainability**, v. 12, p. 7635, 2020. DOI: 10.3390/su12187635.

GUTAI, M. et al. Construction aspects of hybrid water-filled building envelopes. **Journal of Facade Design and Engineering**, v. 8, n. 2, p. 127–152, 2020. DOI: 10.7480/jfde.2020.2.4784.

GUTAI, M. et al. Global carbon viability of glass technologies: life-cycle assessment of standard, advanced and water-filled glass (WFG) building envelopes. **Applied Energy**, v. 367, e123281, 2024. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.123281.

GUTAI, M.; KHEYBARI, A. G. Energy consumption of water-filled glass (WFG) hybrid building envelope. **Energy and Buildings**, v. 224, e110050, 2020. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110050.

KARAGKOUNIS, A. et al. Life cycle assessment and cost benefit analysis for the integrated assessment of an innovative Mn-TiO₂ nanoparticle photocatalytic paint. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL SCIENCE AND TECHNOLOGY**, 18., 2023, Athens, Greece. Anais [...]. Athens: CEST, 2023.

KRAFT, R. et al. Advanced carbon reinforced concrete technologies for façade elements of nearly zero-energy buildings. **Materials**, v. 15, n. 5, 2022. DOI: 10.3390/ma15041619.

LI, M. et al. Challenges and prospects of building thermal insulation coatings in low-carbon transition. **Advances in Engineering Technology Research**, v. 14, n. 1, 2025. DOI: 10.56028/aetr.14.1.826.2025.

OTTELÉ, M.; PERINI, K.; HAAS, E. M. H. A. Life cycle assessment (LCA) of green façades and living wall systems. In: **Eco-efficient construction and building materials: life cycle assessment (LCA), eco-labelling and case studies**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2014. p. 457–483. DOI: 10.1533/9780857097729.3.457.

PERINI, K. et al. Environmental sustainability of building retrofit through vertical greening systems: a life-cycle approach. **Sustainability**, v. 13, n. 9, e4886, 2021. DOI: 10.3390/su13094886.

PIZZATTO, S. M. S. et al. Ventilated facade system: a review. **Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio**, v. 64, n. 3, e100443, 2025. DOI: 10.1016/j.bsecv.2025.100443

PUJADAS-GISPERT, E. et al. Design, construction, and thermal performance evaluation of an innovative bio-based ventilated façade. **Frontiers of Architectural Research**, v. 9, n. 3, p. 681–696, 2020. DOI: 10.1016/j.foar.2020.02.003.

QURRAIE, B. S.; BAKIRHAN, E. K. Evaluation of facade systems in different climate zones regarding energy, comfort, emission, and cost. **Arab Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 30, n. 1, p. 123–136, 2023. DOI: 10.1080/25765299.2023.2180885.

ROSSET, A. et al. Towards the development of safer by design TiO₂ based photocatalytic paint: impacts and performances. **Environmental Science: Nano**, 2021. DOI: 10.1039/d0en01232g.

SALVADORES, F. et al. Efficiencies evaluation of photocatalytic paints under indoor and outdoor air conditions. **Frontiers in Chemistry**, v. 8, p. 551710, 2020. DOI: 10.3389/fchem.2020.551710.

SANTAMARIA, B. M. et al. Evaluation of thermal comfort and energy consumption of water flow glazing as a radiant heating and cooling system: a case study of an office space. **Sustainability**, v. 12, p. 7596, 2020b. DOI: 10.3390/su12187596.

SANTAMARIA, B. M. et al. Experimental validation of water flow glazing: transient response in real test rooms. **Sustainability**, v. 12, e5734, 2020c. DOI: 10.3390/su12145734.

SANTAMARIA, B. M. et al. Industrialization and thermal performance of a new unitized water flow glazing façade. **Sustainability**, v. 12, p. 7564, 2020a. DOI: 10.3390/su12187564.

SANTAMARIA, B. M. et al. Life cycle assessment of dynamic water flow glazing envelopes: a case study with real test facilities. **Energies**, v. 14, p. 2195, 2021. DOI: 10.3390/en1408219.

SCHABOWICZ, K.; ZAWIŚLAK, Ł. Numerical comparison of thermal behaviour between ventilated facades. **Studia Geotechnica et Mechanica**, v. 42, n. 4, p. 297–305, 2020. DOI: 10.2478/sgem-2019-0044.

ŠTOMPF, P. et al. The environmental impacts of façade renovation: a case study of an office building. **Sustainability**, v. 17, n. 15, e6766, 2025. DOI: 10.3390/su17156766.

TAHMASBI, F. et al. Energy-efficient building façades: a comprehensive review of innovative technologies and sustainable strategies. **Journal of Building Engineering**, v. 99, e111643, 2025. DOI: 10.1016/j.job.2024.111643.