

TECNOLOGIAS CONSTRUTIVAS SUSTENTÁVEIS APLICADAS À REDUÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DAS EDIFICAÇÕES URBANAS: UMA REVISÃO INTEGRATIVA DA LITERATURA

SUSTAINABLE CONSTRUCTION TECHNOLOGIES APPLIED TO THE REDUCTION OF THE ENVIRONMENTAL IMPACTS OF URBAN BUILDINGS: AN INTEGRATIVE LITERATURE REVIEW

TECNOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS SOSTENIBLES APLICADAS A LA REDUCCIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES DE LAS EDIFICACIONES URBANAS: UNA REVISIÓN INTEGRATIVA DE LA LITERATURA

José Fernando Bandeira da Silva¹

Aleffy Gil Pereira da Silva²

Orlando Leite Rolim Filho³

Maria Fernanda Bandeira da Silva⁴

RESUMO: Esse artigo buscou analisar as evidências científicas recentes sobre a contribuição das tecnologias construtivas sustentáveis para a redução dos impactos ambientais das edificações urbanas. Trata-se de revisão integrativa da literatura, com busca nas bases eletrônicas MDPI e SciELO e em fontes complementares, no recorte temporal de 2021 a 2026, cuja seleção e relato seguiram as recomendações do protocolo PRISMA 2020. Dos 239 registros identificados, 18 estudos compuseram a amostra final, caracterizados quanto a autoria, ano, país e principais desfechos. Os achados indicam que a substituição de materiais de elevada intensidade de carbono reduziu o potencial de aquecimento global em cerca de 25% nas estruturas de madeira engenheirada e as emissões de dióxido de carbono em 62,73% nos concretos geopoliméricos. A infraestrutura verde aplicada à envoltória gerou economias de energia entre 1,2% e 21,6%, enquanto os sistemas fotovoltaicos integrados reduziram em até 30% as emissões de gases de efeito estufa e o aproveitamento de águas pluviais e cinzas poupou até 12,6% da água potável. Conclui-se que o desempenho ambiental dessas tecnologias depende da adequação climática, logística e construtiva do contexto em que são implantadas.

1

Palavras-chave: Avaliação do ciclo de vida. Construção sustentável. Eficiência energética. Impacto ambiental.

ABSTRACT: This article sought to analyze recent scientific evidence on the contribution of sustainable construction technologies to the reduction of the environmental impacts of urban buildings. This is an integrative literature review, with searches in the MDPI and SciELO electronic databases and in complementary sources, covering the period from 2021 to 2026, whose selection and reporting followed the recommendations of the PRISMA 2020 protocol. Of the 239 records identified, 18 studies made up the final sample, characterized in terms of authorship, year, country and main outcomes. The findings indicate that replacing carbon intensive materials reduced the global warming potential by approximately 25% in engineered timber structures and carbon dioxide emissions by 62.73% in geopolymer concretes. Green infrastructure applied to the building envelope generated energy savings between 1.2% and 21.6%, while integrated photovoltaic systems reduced greenhouse gas emissions by up to 30% and rainwater and greywater reuse saved up to 12.6% of potable water. It is concluded that the environmental performance of these technologies depends on their climatic, logistical and constructive suitability to the context in which they are implemented.

¹ Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

² Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

³ Bacharel em Ciências da Computação pela Faculdade Católica da Paraíba (FCPB).

⁴ Mestranda em Modelos de Decisão e Saúde pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

Keywords: Energy efficiency. Environmental impact. Life cycle assessment. Sustainable construction.

RESUMEN: Este artículo buscó analizar las evidencias científicas recientes sobre la contribución de las tecnologías constructivas sostenibles para la reducción de los impactos ambientales de las edificaciones urbanas. Se trata de una revisión integrativa de la literatura, con búsqueda en las bases electrónicas MDPI y SciELO y en fuentes complementarias, en el recorte temporal de 2021 a 2026, cuya selección y relato siguieron las recomendaciones del protocolo PRISMA 2020. De los 239 registros identificados, 18 estudios compusieron la muestra final, caracterizados en cuanto a autoría, año, país y principales desenlaces. Los hallazgos indican que la sustitución de materiales de elevada intensidad de carbono redujo el potencial de calentamiento global en cerca del 25% en las estructuras de madera de ingeniería y las emisiones de dióxido de carbono en un 62,73% en los hormigones geopoliméricos. La infraestructura verde aplicada a la envolvente generó ahorros de energía entre el 1,2% y el 21,6%, mientras que los sistemas fotovoltaicos integrados redujeron hasta un 30% las emisiones de gases de efecto invernadero y el aprovechamiento de aguas pluviales y grises ahorró hasta un 12,6% del agua potable. Se concluye que el desempeño ambiental de esas tecnologías depende de la adecuación climática, logística y constructiva del contexto en que son implantadas.

Palabras clave: Construcción sostenible. Eficiencia energética. Evaluación del ciclo de vida. Impacto ambiental.

1 INTRODUÇÃO

A urbanização acelerada consolidou as edificações como um dos principais vetores de pressão ambiental nas cidades contemporâneas. O ambiente construído concentra parcela expressiva do consumo mundial de energia, da extração de recursos naturais e das emissões de gases de efeito estufa (GEE), condição que o posiciona no centro das estratégias de descarbonização urbana. Jørgensen e Ma (2025) observam que as tecnologias necessárias para alcançar edificações de emissão zero já se encontram disponíveis, mas permanecem subutilizadas em razão da fragmentação das políticas públicas, das baixas taxas de reabilitação do estoque edificado e de barreiras comportamentais, de modo que a transição do setor depende tanto de inovação técnica quanto de governança.

A compreensão desses impactos exige a perspectiva do ciclo de vida. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) permite quantificar as cargas ambientais associadas à extração de matérias-primas, à produção de materiais, à construção, ao uso, à manutenção e à destinação final da edificação. Khan *et al.* (2022) sistematizam esse campo em três dimensões interdependentes, a mensuração, a gestão e a mitigação do carbono incorporado, e destacam que as estratégias efetivas variam conforme o contexto regional, o que inviabiliza soluções universais. Na mesma direção, Ma *et al.* (2024) demonstraram, em edifício alto de uso corporativo nos Estados Unidos, que o concreto respondeu por 91% da massa estrutural e por 74% do potencial de aquecimento global do sistema estrutural, evidenciando a concentração dos impactos em poucos materiais.

À medida que a eficiência operacional avança, o carbono incorporado assume peso relativo crescente no balanço ambiental das edificações. Bacheva e Raposo Grau (2025) identificaram, contudo, lacunas persistentes nesse campo, uma vez que apenas 39% dos estudos analisados contemplam as fases de fim de vida ou de reúso e 60% das investigações concentram-se em apenas cinco países, o que restringe a transferibilidade dos resultados para contextos como o latino-americano. Essa assimetria geográfica da produção científica constitui, por si só, uma limitação ao planejamento de políticas locais de construção sustentável.

No plano urbano, a envoltória das edificações interage diretamente com o microclima. Ziaemehr *et al.* (2023) ressaltam que materiais de elevada refletância e emissividade reduzem as temperaturas superficiais e do ar, mitigando a ilha de calor urbana (ICU) e, por consequência, a demanda de refrigeração. Resultados convergentes foram obtidos por Zheng e Chen (2024) ao modelarem a aplicação de telhados verdes em escala distrital, com reduções simultâneas de consumo energético e de poluentes atmosféricos, o que indica benefícios que extrapolam o perímetro da edificação isolada.

Outra frente de atuação é a circularidade dos materiais. Charef *et al.* (2021) mapearam dezoito abordagens associadas à economia circular na construção, entre elas a pré-fabricação, o projeto para desmontagem e a logística reversa, e concluíram que a maior parte das barreiras à sua adoção é de natureza organizacional. Schützenhofer *et al.* (2022) acrescentam que o reúso e a reciclagem de materiais reduzem o consumo de recursos e as emissões em determinadas condições, desde que a gestão de resíduos seja planejada desde a fase de projeto.

No contexto brasileiro, as evidências ainda são escassas, porém consistentes. Di Domênico *et al.* (2024) identificaram, em habitação de interesse social no sul do país, que o sistema de vedação vertical concentrou 42% dos impactos na categoria de aquecimento global e que os impactos recorrentes de manutenção superaram os iniciais em horizonte de cinquenta anos. Pierozan *et al.* (2024) demonstraram a viabilidade técnica e econômica de edifícios residenciais de energia quase nula na região Sul, com redução de 57% no consumo de eletricidade, enquanto Ghisi e Freitas (2024) evidenciaram o potencial do aproveitamento de água pluvial e do reúso de água cinza em edificação multifamiliar.

Apesar do volume crescente de publicações, as evidências encontram-se dispersas entre tecnologias, climas e escalas de análise, e os sistemas de certificação ambiental ainda apresentam limitações quanto à avaliação pós-ocupação e à perspectiva integral de ciclo de vida, conforme apontaram Rebelatto *et al.* (2024). Essa fragmentação dificulta a tomada de decisão de projetistas e gestores públicos quanto a quais soluções priorizar em cada contexto. Diante dessa lacuna, o

presente estudo teve como objetivo analisar, a partir da literatura científica publicada entre 2021 e 2026, as evidências disponíveis sobre tecnologias construtivas sustentáveis aplicadas à redução dos impactos ambientais das edificações urbanas, sistematizando autoria, ano, país e principais desfechos dos estudos selecionados.

2 MÉTODOS

Trata-se de revisão integrativa da literatura, método que permite reunir e sintetizar evidências de estudos com delineamentos distintos sobre um mesmo objeto, produzindo um panorama abrangente do estado da arte. O percurso metodológico contemplou seis etapas, a saber, a identificação do tema e a formulação da questão norteadora, o estabelecimento dos critérios de inclusão e exclusão, a definição das informações a serem extraídas, a avaliação crítica dos estudos selecionados, a interpretação dos achados e a apresentação da síntese. O relato seguiu as recomendações do *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) 2020, propostas por Page *et al.* (2021).

A questão norteadora foi construída segundo a estratégia PICO, na qual a população corresponde às edificações urbanas, o interesse às tecnologias construtivas sustentáveis e o contexto à redução dos impactos ambientais, resultando na seguinte formulação: quais são as evidências disponíveis na literatura científica recente sobre a efetividade das tecnologias construtivas sustentáveis na redução dos impactos ambientais das edificações urbanas?

As buscas foram realizadas em outubro de 2026 nas bases eletrônicas MDPI (*Multidisciplinary Digital Publishing Institute*) e SciELO (*Scientific Electronic Library Online*), complementadas por busca livre em mecanismo de indexação acadêmica na web. Foram empregados descritores em português, inglês e espanhol, combinados pelos operadores booleanos AND e OR, conforme detalhado no Quadro 1.

Quadro 1 – Estratégias de busca empregadas nas bases eletrônicas, 2026

Base de dados	Estratégia de busca	Registros
MDPI	("sustainable construction" OR "green building" OR "building technology") AND ("life cycle assessment" OR "environmental impact" OR "carbon emissions" OR "energy performance") AND (building OR urban)	180
SciELO	("construção sustentável" OR "avaliação do ciclo de vida") AND ("edificação" OR "impacto ambiental")	10
Busca livre na web	Combinações dos descritores anteriores com os termos "green roof", "cross-laminated timber", "recycled aggregate", "geopolymer", "BIPV", "phase change material" e "rainwater harvesting"	49
Total		239

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Foram adotados como critérios de inclusão: artigos científicos originais ou de revisão, publicados entre janeiro de 2021 e setembro de 2026, nos idiomas português, inglês ou espanhol, com texto completo disponível, que avaliassem o desempenho ambiental de ao menos uma tecnologia construtiva aplicada a edificações urbanas e que apresentassem desfechos quantitativos mensuráveis. Foram excluídos editoriais, cartas ao editor, resumos de eventos, capítulos de livro, estudos cujo objeto fosse infraestrutura não edilícia, tais como pavimentos, barragens e obras viárias, publicações sem desfecho ambiental quantificado, registros duplicados e documentos sem metadados completos.

A seleção ocorreu em duas etapas. Na primeira, dois revisores examinaram de forma independente títulos e resumos de todos os registros recuperados. Na segunda, os relatórios potencialmente elegíveis foram lidos na íntegra e confrontados com os critérios estabelecidos. As divergências foram resolvidas por consenso, com participação de um terceiro revisor quando necessário. A extração dos dados utilizou instrumento padronizado, elaborado em planilha eletrônica, contemplando autoria, ano de publicação, país de realização do estudo, delineamento metodológico, tecnologia construtiva avaliada e principais desfechos ambientais.

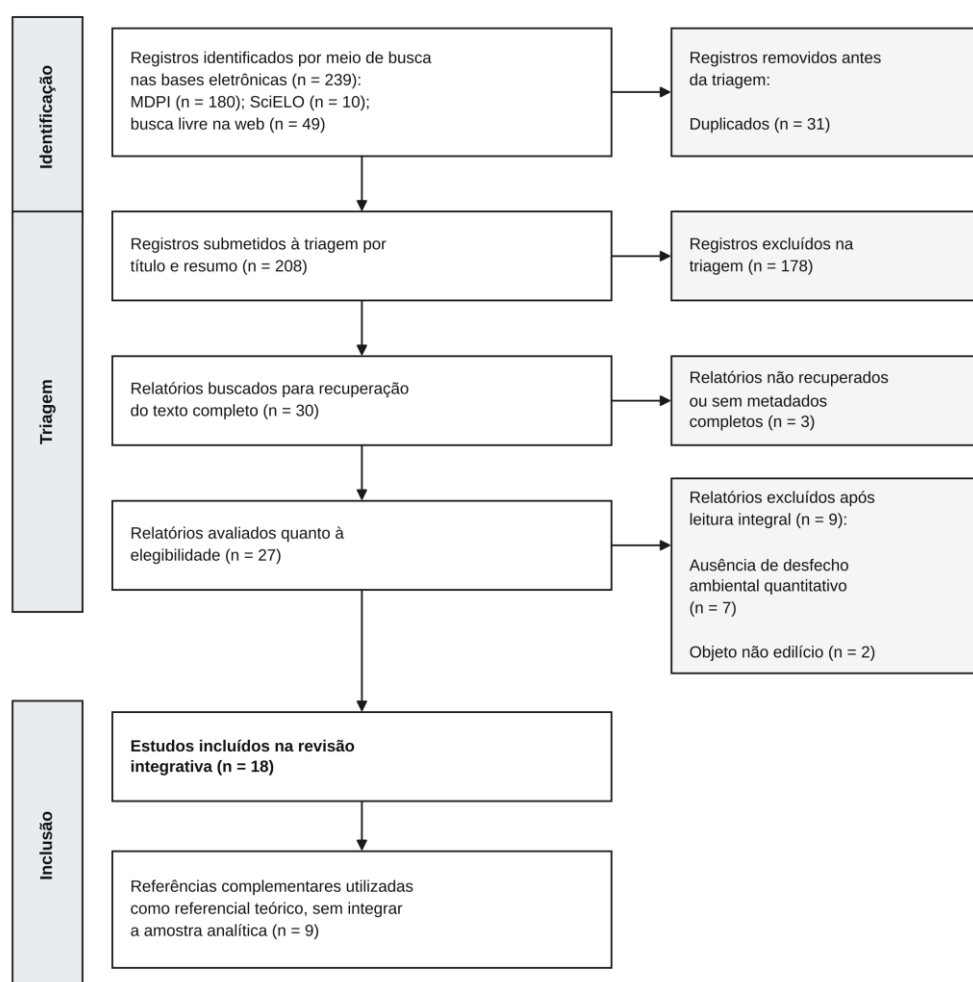
A síntese dos achados foi conduzida de forma descritiva e temática. Os estudos foram agrupados em quatro categorias analíticas definidas a posteriori, a partir da convergência de seus objetos: materiais e sistemas estruturais de baixo carbono; infraestrutura verde e desempenho da envoltória; geração distribuída de energia e reabilitação energética; e gestão da água e desempenho ambiental ao longo do ciclo de vida. A caracterização da amostra foi apresentada por meio de frequências absolutas e relativas.

Por se tratar de pesquisa desenvolvida exclusivamente a partir de fontes secundárias de domínio público, sem envolvimento direto de seres humanos ou animais, não houve necessidade de apreciação por Comitê de Ética em Pesquisa, nos termos da Resolução nº 466, de 12 de dezembro de 2012, do Conselho Nacional de Saúde. Foram observados, em todas as etapas, os princípios de integridade científica e de respeito à autoria das obras consultadas.

3 RESULTADOS

A busca nas bases eletrônicas resultou em 239 registros, dos quais 31 foram removidos por duplicidade. Após a triagem de 208 títulos e resumos, 178 registros foram excluídos por não atenderem aos critérios de elegibilidade. Dos 30 relatórios buscados para leitura integral, três não foram recuperados ou não apresentavam metadados completos. Entre os 27 relatórios avaliados quanto à elegibilidade, nove foram excluídos por ausência de desfecho ambiental quantitativo ou por tratarem de objeto não edilício, tendo sido posteriormente utilizados como referencial teórico. A amostra final foi composta por 18 estudos (Figura 1).

Figura 1 – Fluxograma do processo de identificação, triagem e inclusão dos estudos, segundo o protocolo PRISMA 2020, 2026



Fonte: Elaborado pelos autores (2026), com base em Page et al. (2021).

Quanto ao ano de publicação, observou-se concentração no período mais recente, com um estudo publicado em 2021 (5,6%), dois em 2022 (11,1%), cinco em 2023 (27,8%), sete em 2024

(38,9%) e três em 2025 (16,6%). Em relação ao país de realização, a China liderou a produção, com seis estudos (33,3%), seguida por Itália, Brasil e Coreia do Sul, com dois estudos cada (11,1%). Austrália, Argélia, Panamá e Estados Unidos contribuíram com um estudo cada (5,6%), além de um estudo conduzido simultaneamente em Itália e Espanha e de um estudo multicêntrico abrangendo países da África, da Ásia e da América Latina. Quanto ao delineamento, predominaram as avaliações de ciclo de vida, presentes em onze estudos, seguidas por simulações computacionais de desempenho termoenergético e por estudos experimentais ou de monitoramento em campo.

A caracterização dos estudos incluídos quanto a autoria, ano, país, tecnologia avaliada e principais desfechos é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização dos estudos incluídos na revisão integrativa quanto a autoria, ano, país, tecnologia avaliada e principais desfechos, n=18, 2026

Autor	Ano	País	Tecnologia avaliada	Principais desfechos
Shi <i>et al.</i>	2021	China	Concreto geopolimérico de cinza volante	Redução de 62,73% nas emissões de CO ₂ em relação ao concreto de cimento Portland de resistência equivalente; a razão ativador/cinza volante respondeu por 87,2% da variação das emissões.
Chen <i>et al.</i>	2022	China	Madeira laminada cruzada (CLT) em edifício residencial	Redução de 25% no potencial de aquecimento global frente à alternativa equivalente em concreto armado, mesmo com transporte intercontinental da matéria-prima.
Chen Austin <i>et al.</i>	2022	Panamá	Materiais de mudança de fase (PCM) na envoltória	Reduções superiores a 50% no consumo de energia para resfriamento nas configurações de cobertura; PCM com temperatura de fusão de 27 °C completou ciclo anual de carga e descarga.
Amoruso e Schuetze	2023	Coreia do Sul	Sistemas fotovoltaicos integrados à edificação (BIPV)	Redução de até 30% nas emissões de GEE com cobertura integral da envoltória; retorno entre 12 anos, em edifício residencial, e 41 anos, em edifício de uso misto, no horizonte de 50 anos.
Bredenoord e Kulshreshtha	2023	Multicêntrico (África, Ásia e América Latina)	Blocos de terra comprimida estabilizados (BTCE)	Viabilidade dos blocos em habitação social de baixo custo; o programa mexicano Échale alcançou cerca de 250 mil soluções habitacionais e 450 mil empregos; no Nepal, mais de 3,5 mil moradias e cerca de 200 microempresas.
Owolabi <i>et al.</i>	2023	Coreia do Sul	Reabilitação energética de edificação residencial	Economia de 2.098 kWh em aquecimento e de 6.307 kWh em refrigeração, com retorno de 1,6 ano; redução de 3,3 toneladas de CO ₂ por ano; correlação de 0,92 entre dados medidos e simulados.

Autor	Ano	País	Tecnologia avaliada	Principais desfechos
Rashedi <i>et al.</i>	2023	Itália e Espanha	Telhados verdes extensivos, semi-intensivos e intensivos	Tempos de retorno energético e de emissões inferiores à vida útil de 45 anos; Madri apresentou retorno de 15% a 46% mais rápido em energia e de 11% a 37% em emissões que Roma.
Zhou <i>et al.</i>	2023	China	Construção pré-fabricada	Redução aproximada de 86 kg de CO ₂ por metro quadrado em relação à construção convencional moldada no local; a etapa de montagem concentrou as maiores emissões.
Di Domênico <i>et al.</i>	2024	Brasil	Avaliação do ciclo de vida de habitação de interesse social térrea	O sistema de vedação vertical concentrou 42% dos impactos totais na categoria de aquecimento global; os impactos recorrentes de manutenção superaram os iniciais no horizonte de 50 anos.
Ghisi e Freitas	2024	Brasil	Aproveitamento de água pluvial e reúso de água cinza	Potencial de economia de água potável de 6,9% com água pluvial e de 5,7% com água cinza; redução de 11,8% no volume de drenagem pluvial; retorno de 57 a 76 meses para o sistema pluvial.
Giuffrida <i>et al.</i>	2024	Itália	Sistemas de vedação em terra crua	Os sistemas de terra aliviada apresentaram os menores impactos ambientais e a taipa não estabilizada o melhor desempenho térmico dinâmico; as soluções com fibras naturais registraram os maiores estoques de carbono.
Jolly <i>et al.</i>	2024	Austrália	Estrutura em madeira massiva de média altura	Potencial de aquecimento global cerca de 30 vezes menor e uso de água doce cerca de 20 vezes menor que a alternativa em concreto; economia de aproximadamente AUD 500 mil, equivalente a 6% do custo.
Ma <i>et al.</i>	2024	Estados Unidos	Avaliação do ciclo de vida estrutural apoiada em BIM de edifício alto	O concreto representou 91% da massa estrutural e 74% do potencial de aquecimento global; intensidade de carbono incorporado de 382,12 kgCO ₂ eq/m ² nas etapas A a C.
Nocera <i>et al.</i>	2024	Itália	Sistemas de vegetação vertical	Redução de até 1,9 °C na temperatura superficial interna de paredes leves e de cerca de 60% no fluxo de calor nos horários de pico em relação à parede sem vegetação.
Zheng e Chen	2024	China	Telhados verdes em escala urbana	Economia de energia de 1,73%, em edifício de escritórios, a 21,6%, em centro comercial; redução anual de 47,68 a 64,34 kt de CO ₂ e de 130,97 t de NO _x no distrito analisado.
Hamza <i>et al.</i>	2025	Argélia	Concreto autoadensável com agregados reciclados	A substituição de 50% dos agregados naturais reduziu em até 35% o consumo de combustíveis fósseis e em até 32% as emissões de GEE.

Autor	Ano	País	Tecnologia avaliada	Principais desfechos
Mi <i>et al.</i>	2025	China	Sistemas de vegetação vertical em quatro zonas climáticas	Redução do consumo anual de energia de 1,2% a 8,7% conforme a cidade; redução de carbono de 2.663,42 kgCO ₂ por ano em Guangzhou e de 499,60 kgCO ₂ por ano em Xi'an.
Zhang <i>et al.</i>	2025	China	Concreto com agregado graúdo reciclado	Maiores taxas de substituição reduziram os potenciais de acidificação e de eutrofização; a reciclagem móvel reduziu em até 82,27% o potencial de aquecimento global frente à disposição em aterro, com vantagem mantida até 60 km de transporte.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

No que se refere aos materiais e sistemas estruturais de baixo carbono, Shi *et al.* (2021) registraram redução de 62,73% nas emissões de dióxido de carbono (CO₂) do concreto geopolimérico de cinza volante em relação ao concreto de cimento Portland de resistência equivalente. Chen *et al.* (2022) verificaram redução de 25% no potencial de aquecimento global de edifício residencial em madeira laminada cruzada (CLT) frente à alternativa em concreto armado, enquanto Jolly *et al.* (2024) obtiveram, em edificação de média altura na Austrália, potencial de aquecimento global cerca de trinta vezes menor e uso de água doce cerca de vinte vezes menor que o da solução convencional. Zhou *et al.* (2023) quantificaram redução aproximada de 86 kg de CO₂ por metro quadrado na construção pré-fabricada em relação à moldada no local.

Ainda nessa categoria, Zhang *et al.* (2025) observaram que o aumento da taxa de substituição por agregado graúdo reciclado reduziu os potenciais de acidificação e de eutrofização, com redução de até 82,27% no potencial de aquecimento global quando adotada a reciclagem móvel em comparação à disposição em aterro, vantagem mantida para distâncias de transporte inferiores a 60 km. Hamza *et al.* (2025) registraram, em concreto autoadensável com 50% de agregados reciclados, redução de até 35% no consumo de combustíveis fósseis e de até 32% nas emissões de GEE. Giuffrida *et al.* (2024) identificaram que os sistemas de terra aliviada apresentaram os menores impactos ambientais entre oito soluções em terra crua avaliadas, e Bredenoord e Kulshreshtha (2023) documentaram a aplicação de blocos de terra comprimida estabilizados (BTCE) em programas habitacionais de três continentes.

No campo da infraestrutura verde e do desempenho da envoltória, Zheng e Chen (2024) estimaram economias de energia entre 1,73%, em edifícios de escritórios, e 21,6%, em centros comerciais, com redução anual de 47,68 a 64,34 kt de CO₂ no distrito analisado. Rashedi *et al.*

(2023) verificaram que os tempos de retorno energético e de emissões dos telhados verdes foram inferiores à vida útil de 45 anos, com desempenho de 15% a 46% mais rápido em Madri que em Roma. Nocera *et al.* (2024) mediram reduções de até 1,9 °C na temperatura superficial interna de paredes leves e de cerca de 60% no fluxo de calor nos horários de pico, e Mi *et al.* (2025) obtiveram reduções de consumo anual de energia entre 1,2% e 8,7% conforme a cidade avaliada. Chen Austin *et al.* (2022) registraram, em clima tropical, reduções superiores a 50% no consumo de energia para resfriamento com o emprego de materiais de mudança de fase (PCM) em coberturas.

Quanto à geração distribuída de energia e à reabilitação energética, Amoruso e Schuetze (2023) obtiveram reduções de até 30% nas emissões de GEE com sistemas fotovoltaicos integrados à edificação (BIPV) aplicados à totalidade da envoltória, com retorno do investimento entre doze e quarenta e um anos conforme a tipologia. Owolabi *et al.* (2023) documentaram, após auditoria energética em edificação residencial, economia de 2.098 kWh em aquecimento e de 6.307 kWh em refrigeração, com retorno de 1,6 ano e redução de 3,3 toneladas de CO₂ por ano.

No que concerne à gestão da água e ao desempenho ao longo do ciclo de vida, Ghisi e Freitas (2024) estimaram potencial de economia de água potável de 6,9% com o aproveitamento de água pluvial e de 5,7% com o reúso de água cinza em edificação multifamiliar, além de redução de 11,8% no volume de drenagem pluvial. Di Domênico *et al.* (2024) identificaram que o sistema de vedação vertical concentrou 42% dos impactos de aquecimento global de habitação de interesse social e que os impactos recorrentes de manutenção superaram os impactos iniciais. Ma *et al.* (2024) registraram intensidade de carbono incorporado de 382,12 kgCO₂eq/m² nas etapas A a C de edifício alto modelado em ambiente de Modelagem da Informação da Construção (BIM).

4 DISCUSSÃO

Os achados reunidos indicam que a efetividade ambiental das tecnologias construtivas sustentáveis não decorre de sua adoção isolada, mas da adequação entre a solução escolhida, o clima local, a cadeia de suprimentos e a fase do ciclo de vida sobre a qual se pretende atuar. Essa leitura converge com a proposição de Khan *et al.* (2022), para quem as estratégias de mitigação do carbono incorporado seguem lógicas regionais específicas, e com a análise de Jørgensen e Ma (2025), segundo a qual a lacuna atual do setor é menos tecnológica e mais relacionada à integração entre projeto, digitalização e políticas públicas.

A substituição de materiais de elevada intensidade de carbono concentrou os maiores ganhos ambientais da amostra. A amplitude dos resultados obtidos para a madeira engenheirada, que variou de 25%, no estudo de Chen *et al.* (2022), a cerca de trinta vezes, no de Jolly *et al.* (2024), não deve ser interpretada como contradição, mas como expressão de fronteiras de sistema e de critérios de contabilização distintos, sobretudo quanto ao tratamento do carbono biogênico e do fim de vida. Essa heterogeneidade metodológica é exatamente a limitação apontada por Bacheva e Raposo Grau (2025), que identificaram que apenas 39% dos estudos de impacto incorporado contemplam as etapas de fim de vida ou de reúso, o que compromete a comparabilidade entre pesquisas e exige cautela na transposição de resultados entre contextos.

Os resultados relativos aos agregados reciclados merecem leitura igualmente matizada. Zhang *et al.* (2025) demonstraram que o benefício ambiental da substituição é condicionado à distância de transporte, dissipando-se acima de 60 km, enquanto Hamza *et al.* (2025) obtiveram reduções expressivas com taxa intermediária de substituição associada a adições minerais reativas. A conclusão prática é que a circularidade produz ganho ambiental apenas quando a logística reversa é territorialmente eficiente, o que reforça o diagnóstico de Charef *et al.* (2021) sobre o caráter predominantemente organizacional das barreiras à economia circular na construção, e a recomendação de Schützenhofer *et al.* (2022) de que o planejamento da desconstrução seja antecipado para a fase de projeto.

No grupo da infraestrutura verde, chama atenção a amplitude das economias energéticas observadas, de 1,2% a 21,6% entre os estudos de Mi *et al.* (2025) e de Zheng e Chen (2024). Essa variação associa-se à tipologia edilícia, à relação entre área de envoltória e volume construído e ao clima. Edificações com grandes coberturas e elevada carga térmica, como centros comerciais, beneficiam-se de forma desproporcional, ao passo que edifícios verticalizados de escritórios apresentam ganhos marginais. Tal constatação sugere que a prescrição indiscriminada de telhados verdes em normativas urbanas pode gerar expectativas de desempenho não realizáveis, sendo mais produtiva a adoção de critérios de elegibilidade por tipologia. Soma-se a isso o benefício de escala urbana descrito por Ziaeemehr *et al.* (2023) quanto à mitigação da ICU, cujo valor não é capturado por indicadores restritos à edificação individual.

O desempenho dos sistemas BIPV, descrito por Amoruso e Schuetze (2023), ilustra a tensão entre eficácia ambiental e viabilidade econômica, uma vez que a cobertura integral da envoltória maximiza a redução de emissões, mas amplia o tempo de retorno para até quarenta e um anos em tipologias mistas. Em contraste, a reabilitação energética analisada por Owolabi *et al.* (2023) alcançou retorno de 1,6 ano com investimento reduzido, o que posiciona as medidas

de baixo custo aplicadas ao estoque existente como estratégia de maior custo-efetividade imediata. Essa assimetria ajuda a explicar por que Jørgensen e Ma (2025) atribuem às baixas taxas de reabilitação, e não à indisponibilidade tecnológica, parte expressiva do atraso na descarbonização do setor.

Os dois estudos brasileiros da amostra apontam para uma agenda específica do país. Di Domênico *et al.* (2024) evidenciaram que os impactos recorrentes de manutenção superaram os iniciais em habitação de interesse social, o que desloca o foco da discussão da escolha pontual de materiais para a durabilidade e a manutenibilidade dos sistemas. Ghisi e Freitas (2024), por sua vez, demonstraram que a gestão predial da água, ainda pouco contemplada nas análises de carbono, oferece ganhos ambientais relevantes com tempos de retorno compatíveis com a lógica de investimento do setor. Esses resultados dialogam com Pierozan *et al.* (2024), que comprovaram a viabilidade de edificações de energia quase nula no Sul do Brasil, e sugerem que a combinação de medidas passivas, geração local e gestão hídrica tende a ser mais promissora no contexto nacional do que a adoção isolada de materiais inovadores.

A consolidação dessas evidências em instrumentos de política pública esbarra, contudo, nas limitações dos sistemas de certificação ambiental. Rebelatto *et al.* (2024) identificaram que esquemas amplamente difundidos ainda carecem de avaliação pós-ocupação e de perspectiva integral de ciclo de vida, lacuna que se torna crítica quando confrontada com o achado de Ma *et al.* (2024) de que a etapa de produto domina o carbono incorporado de edificações altas. Sem métricas que capturem simultaneamente as fases de produto, de uso e de fim de vida, há risco de que a certificação reconheça desempenho que não se confirma na operação.

O presente estudo apresenta limitações que devem ser consideradas na interpretação de seus resultados. A restrição a duas bases eletrônicas principais e a três idiomas pode ter deixado de recuperar evidências relevantes publicadas em veículos regionais, o que é particularmente sensível no caso latino-americano. A heterogeneidade das fronteiras de sistema, das unidades funcionais e dos métodos de caracterização de impacto adotados pelos estudos primários impediu qualquer tentativa de síntese quantitativa agregada, de modo que as comparações realizadas têm caráter descritivo. Além disso, a predominância de estudos conduzidos na China e na Europa limita a transferibilidade direta dos achados para climas tropicais e para contextos de informalidade construtiva. Recomenda-se, para pesquisas futuras, a realização de avaliações de ciclo de vida com fronteiras harmonizadas em clima tropical úmido, a incorporação sistemática das fases de manutenção e de fim de vida e o desenvolvimento de inventários

nacionais de materiais que viabilizem comparações consistentes entre tecnologias no contexto brasileiro.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente revisão integrativa reuniu 18 estudos publicados entre 2021 e 2025 e evidenciou que as tecnologias construtivas sustentáveis dispõem de base empírica consistente para a redução dos impactos ambientais das edificações urbanas. Os maiores ganhos concentraram-se na substituição de materiais de elevada intensidade de carbono, com reduções que alcançaram 62,73% nas emissões de CO₂ em concretos geopoliméricos e 25% no potencial de aquecimento global em estruturas de madeira engenheirada, seguidos pela infraestrutura verde aplicada à envoltória, pela geração fotovoltaica integrada e pela gestão predial da água.

Os resultados indicam, contudo, que nenhuma tecnologia apresenta desempenho uniforme entre contextos. A efetividade ambiental mostrou-se condicionada ao clima, à tipologia edilícia, à distância de transporte dos insumos e à fase do ciclo de vida priorizada, de modo que decisões de projeto fundamentadas exigem análise situada e não a simples transposição de resultados internacionais. A constatação de que os impactos recorrentes de manutenção podem superar os iniciais reforça a necessidade de deslocar o foco da seleção pontual de materiais para o desempenho da edificação ao longo de toda a sua vida útil.

Para o contexto brasileiro, a escassez de estudos nacionais e a ausência de inventários de ciclo de vida representativos constituem o principal obstáculo à formulação de políticas de construção sustentável baseadas em evidências. Recomenda-se o fortalecimento de pesquisas em clima tropical, a harmonização metodológica das avaliações de ciclo de vida e a incorporação de critérios de desempenho pós-ocupação aos instrumentos de certificação e de financiamento habitacional, de modo que os ganhos ambientais projetados em fase de concepção se confirmem na operação das edificações.

REFERÊNCIAS

AMORUSO, Fabrizio M.; SCHUETZE, Thorsten. Carbon life cycle assessment and costing of building integrated photovoltaic systems for deep low-carbon renovation. *Sustainability*, Basel, v. 15, n. 12, art. 9460, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su15129460>. Acesso em: 6 out. 2026.

BACHEVA, Tsvetelina Spasova; RAPOSO GRAU, Javier F. Embodied impacts in buildings: a systematic review of life cycle gaps and sectoral integration strategies. *Buildings*, Basel, v. 15, n. 10, art. 1661, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings15101661>. Acesso em: 6 out. 2026.

BREDENOORD, Jan; KULSHRESHTHA, Yask. Compressed stabilized earthen blocks and their use in low-cost social housing. *Sustainability*, Basel, v. 15, n. 6, art. 5295, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su15065295>. Acesso em: 6 out. 2026.

CHAREF, Rabia; MOREL, Jean-Claude; RAKHSHAN, Kambiz. Barriers to implementing the circular economy in the construction industry: a critical review. *Sustainability*, Basel, v. 13, n. 23, art. 12989, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su132312989>. Acesso em: 6 out. 2026.

CHEN, Cindy X. *et al.* Comparative life cycle assessment of mass timber and concrete residential buildings: a case study in China. *Sustainability*, Basel, v. 14, n. 1, art. 144, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su14010144>. Acesso em: 6 out. 2026.

CHEN AUSTIN, Miguel; ARAÚZ, Jesús; MORA, Dafni. Numerical assessment of different phase change materials as a passive strategy to reduce energy consumption in buildings under tropical climates. *Buildings*, Basel, v. 12, n. 7, art. 906, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings12070906>. Acesso em: 6 out. 2026.

DI DOMÊNICO, Marianne; RIBEIRO, Lauro André; SILVA, Thaísa Leal da. Life cycle assessment of single-story low-income housing: a Brazilian case study. *Buildings*, Basel, v. 14, n. 7, art. 1980, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings14071980>. Acesso em: 6 out. 2026.

GHISI, Enedir; FREITAS, Douglas Ancelmo. Economic feasibility of rainwater harvesting and greywater reuse in a multifamily building. *Water*, Basel, v. 16, n. 11, art. 1580, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w16111580>. Acesso em: 6 out. 2026.

GIUFFRIDA, Giada *et al.* Compared environmental lifecycle performances of earth-based walls to drive building envelope design. *Sustainability*, Basel, v. 16, n. 4, art. 1367, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su16041367>. Acesso em: 6 out. 2026.

HAMZA, Fadhila *et al.* Sustainable self-compacting concrete with recycled aggregates, ground granulated blast slag, and limestone filler: a technical and environmental assessment. *Sustainability*, Basel, v. 17, n. 8, art. 3395, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su17083395>. Acesso em: 6 out. 2026.

JOLLY, Riley *et al.* Life cycle assessment and cost analysis of mid-rise mass timber vs. concrete buildings in Australia. *Sustainability*, Basel, v. 16, n. 15, art. 6465, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su16156465>. Acesso em: 6 out. 2026.

JØRGENSEN, Bo Nørregaard; MA, Zheng Grace. Energy efficiency and decarbonization strategies in buildings: a review of technologies, policies, and future directions. *Applied Sciences*, Basel, v. 15, n. 21, art. 11660, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app152111660>. Acesso em: 6 out. 2026.

KHAN, Sahil Ali *et al.* Life cycle assessment of embodied carbon in buildings: background, approaches and advancements. *Buildings*, Basel, v. 12, n. 11, art. 1944, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings12111944>. Acesso em: 6 out. 2026.

MA, Lijian; AZARI, Rahman; ELNIMEIRI, Mahjoub. A building information modeling-based life cycle assessment of the embodied carbon and environmental impacts of high-rise building

structures: a case study. *Sustainability*, Basel, v. 16, n. 2, art. 569, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/sui6020569>. Acesso em: 6 out. 2026.

MI, Hongtu *et al.* The influence of vertical greening systems on building energy consumption and comprehensive carbon emission. *Buildings*, Basel, v. 15, n. 3, art. 471, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings15030471>. Acesso em: 6 out. 2026.

NOCERA, Francesco *et al.* Assessing the impact of vertical greenery systems on the thermal performance of walls in Mediterranean climates. *Energies*, Basel, v. 17, n. 20, art. 5090, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en17205090>. Acesso em: 6 out. 2026.

OWOLABI, Abdulhameed Babatunde *et al.* Analysis of the energy performance of a retrofitted low-rise residential building after an energy audit. *Sustainability*, Basel, v. 15, n. 16, art. 12129, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/sui151612129>. Acesso em: 6 out. 2026.

PAGE, Matthew J. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, Londres, v. 372, art. n71, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>. Acesso em: 6 out. 2026.

PIEROZAN, Eduardo *et al.* Technical and economic feasibility of multi-family social housing and nearly zero-energy buildings in southern Brazil. *Sustainability*, Basel, v. 16, n. 7, art. 2608, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/sui16072608>. Acesso em: 6 out. 2026.

RASHEDI, Mohammad Raoof *et al.* Lifecycle analysis of green roofs in the Mediterranean climate. *Eng*, Basel, v. 4, n. 4, art. 147, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/eng4040147>. Acesso em: 6 out. 2026.

REBELATTO, Bianca Gasparetto *et al.* Examining energy efficiency practices in office buildings through the lens of LEED, BREEAM, and DGNB certifications. *Sustainability*, Basel, v. 16, n. 11, art. 4345, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/sui16114345>. Acesso em: 6 out. 2026.

SCHÜTZENHOFER, Stefan *et al.* Improvement of environmental sustainability and circular economy through construction waste management for material reuse. *Sustainability*, Basel, v. 14, n. 17, art. 11087, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/sui141711087>. Acesso em: 6 out. 2026.

SHI, Xiaoshuang *et al.* Life cycle assessment and impact correlation analysis of fly ash geopolymers concrete. *Materials*, Basel, v. 14, n. 23, art. 7375, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma14237375>. Acesso em: 6 out. 2026.

ZHANG, Heng *et al.* Multi-indicator environmental impact assessment of recycled aggregate concrete based on life cycle analysis. *Buildings*, Basel, v. 15, n. 13, art. 2301, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings15132301>. Acesso em: 6 out. 2026.

ZHENG, Yuanfan; CHEN, Liang. Modeling the effect of green roofs for building energy savings and air pollution reduction in Shanghai. *Sustainability*, Basel, v. 16, n. 1, art. 286, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/sui16010286>. Acesso em: 6 out. 2026.

ZHOU, Fang *et al.* Analyze differences in carbon emissions from traditional and prefabricated buildings combining the life cycle. *Buildings*, Basel, v. 13, n. 4, art. 874, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings13040874>. Acesso em: 6 out. 2026.

ZIAEEMEHR, Bahador *et al.* Increasing solar reflectivity of building envelope materials to mitigate urban heat islands: state-of-the-art review. *Buildings*, Basel, v. 13, n. 11, art. 2868, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings13112868>. Acesso em: 6 out. 2026.