AVALIAÇÃO INTEGRADA ACERCA DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Auanny Alícia Alves da Silva [1]
Luana Dantas de Medeiros [2]
Ana Beatriz Silva de Araújo [3]
Ana Maria Gonçalves Duarte [4]

RESUMO

Este estudo analisa criticamente a produção científica sobre a incorporação de resíduos em materiais de construção, com foco na forma que a dimensão ambiental da sustentabilidade é abordada nos estudos. A pesquisa caracteriza-se como uma revisão exploratória de natureza qualitativo-quantitativa, realizada a partir de busca na base Scopus, considerando artigos publicados entre 2021 e 2026, inseridos na área de engenharia e classificados como *open access*. A estratégia de busca utilizou descritores relacionados a resíduos, materiais de construção e impacto ambiental, aplicados aos campos de título, resumo e palavras-chave, resultando em 1178 documentos. A amostra final foi composta por 14 artigos empíricos selecionados com base na aderência temática e no critério de relevância científica, priorizando estudos com número de citações igual ou superior a 75. Os resultados indicam que 71,43% dos estudos analisados mantêm o desempenho mecânico dos materiais como eixo central ou exclusivo das investigações. Observou-se que a totalidade da amostra (100%) faz menções qualitativas à dimensão ambiental; entretanto, apenas 57,14% empregam metodologias estruturadas, como a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), indicando limitações quanto à profundidade e padronização dessas análises. A constatação mais alarmante revela que somente 35,71% dos trabalhos confirmam quantitativamente os benefícios ambientais propostos, evidenciando severa fragilidade na validação dos resultados. Além disso, a variabilidade metodológica e a subjetividade nas avaliações ambientais comprometem a comparabilidade dos estudos. Conclui-se que existe forte desalinhamento entre o discurso de sustentabilidade e a sua incorporação metodológica na produção científica das engenharias, indicando um gargalo na integração da dimensão ambiental como eixo estruturante das análises técnicas.

Palavras-chave: Reaproveitamento de resíduos, Sustentabilidade, Desempenho mecânico, Integração técnica-ambiental.

[1] Mestranda do Curso de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, auanny.alicia@estudante.ufcg.edu.br;
[2] Doutoranda do Curso de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, luanadantas.engenheira@gmail.com;
[3] Graduanda em Química Industrial da Universidade Estadual da Paraíba – UEPB, ana.silva.araujo@aluno.uepb.edu.br;
[4] Orientadora: Pesquisadora e doutora em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, ana.duartemendonca@professor.ufcg.edu.br.

INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil encontra-se no epicentro das discussões climáticas globais. Operando historicamente sob um modelo econômico linear estritamente extrativista de extração, consumo e descarte (Ghufran *et al*., 2022), o setor é hoje responsável por cerca de 40% de todo o desperdício gerado globalmente, 40% do consumo de recursos naturais e 33% de todas as emissões antropogênicas (Eberhardt *et al*., 2020; Honic *et al*., 2021). Diante desse cenário, a literatura científica tem voltado seus esforços para a transição em direção à economia circular, buscando restaurar e fechar os ciclos de materiais através do reuso e da reciclagem (Norouzi *et al*., 2021; Silva *et al*., 2021). A presente pesquisa justifica-se pela necessidade de compreender criticamente se a produção científica atual está, de fato, consolidando práticas sustentáveis fundamentadas ou apenas reproduzindo um discurso verde ancorado na mera substituição material sem comprovação quantitativa (Eberhardt *et al*., 2020; Resch *et al*., 2021). O objetivo principal deste estudo é analisar como a produção científica avalia a incorporação de resíduos em materiais de construção, investigando a proporção de integração entre desempenho mecânico e avaliações de impacto ambiental.

A transição da engenharia civil em direção à sustentabilidade exige a superação do paradigma "*business as usual*", caracterizado pelo foco exclusivo no desempenho mecânico imediato e na viabilidade econômica de curto prazo (Miraldo *et al*., 2021; Norouzi *et al*., 2021). Apesar da urgência com a crise climática, a implementação da economia circular na indústria da construção ainda é descrita na literatura como em processo inicial de desenvolvimento, operando de forma altamente fragmentada e sem um direcionamento metodológico unificado entre os pesquisadores (Eberhardt *et al*., 2020).

No campo da pesquisa e desenvolvimento de materiais, observa-se uma proliferação de estudos voltados ao reaproveitamento de subprodutos industriais e resíduos sólidos, tais como Resíduos de Construção e Demolição (RCD), pó de vidro, rejeitos de mineração, borracha de pneus e escórias de alto-forno — voltados à formulação de matrizes cimentícias e ligantes geopoliméricos (Abdelzaher, 2023; Ahmed *et al*., 2021; Kul *et al*., 2023; Ozcelikci *et al*., 2023; Valente *et al*., 2022). Entretanto, a incorporação física de um resíduo não garante, *a priori*, um saldo ambiental positivo (Silva et al., 2021). Em países do continente europeu, por exemplo, embora representem

entre 25% e 46% de todo o lixo gerado, uma parcela significativa dos resíduos de construção ainda é destinada a aterros ou submetida a processos de *downcycling* de baixo valor agregado, em vez de ser reciclada de forma verdadeiramente circular (Kul *et al*., 2023; Ozcelikci *et al*., 2023).

Para evitar falsas premissas ecológicas e mitigar riscos de *greenwashing*, a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) desponta como o principal instrumento multicritério para quantificar os impactos ambientais "do berço ao túmulo" (*cradle-to-grave*) (Honic *et al*., 2021; Silva *et al*., 2021). Contudo, a validade e a confiabilidade das avaliações ambientais no setor têm sido frequentemente questionadas devido à falta de transparência, limites do sistema inconsistentes e falta de reprodutibilidade (Resch *et al*., 2021). Diferentes escolhas subjetivas de pesquisadores e praticantes de ACV podem fazer com que os resultados de emissões da fase de construção variem drasticamente de 0,03 a 2,00 toneladas de CO_2 equivalente por metro quadrado (t CO_2e/m²) para empreendimentos de portes semelhantes (Resch et al., 2021). Esse elo perdido entre a intenção sustentável e a execução de análises quantitativas rigorosas inibe a formulação de conclusões sólidas que poderiam, de fato, transformar o paradigma produtivo da engenharia civil.

METODOLOGIA

O presente estudo caracteriza-se como uma revisão exploratória sistemática com abordagem qualitativo-quantitativa. Para o levantamento do estado da arte, utilizou-se a base de dados *Scopus*, selecionada por seu vasto acervo de publicações de alto impacto na área tecnológica.

A estratégia de busca, conduzida no primeiro semestre de 2026, limitou-se a artigos publicados na janela temporal de 2021 a 2026. Os descritores (em língua inglesa) foram combinados a partir de três eixos temáticos estruturantes: (i) reaproveitamento de resíduos; (ii) materiais de construção; e (iii) impacto ambiental. A *string* de busca foi aplicada aos campos de título, resumo e palavras-chave. Foram aplicados filtros adicionais para restringir a busca a artigos de acesso aberto (*open access*) e classificados dentro da macroárea de Engenharias, resultando em um retorno primário de 1178 documentos.

Posteriormente, aplicaram-se critérios de exclusão pautados na aderência temática estrita à avaliação de materiais construtivos sustentáveis. Para garantir a solidez

metodológica da amostra, estabeleceu-se um critério de relevância científica baseado no impacto acadêmico, selecionando exclusivamente estudos que apresentassem um número de citações igual ou superior a 75.

Para assegurar a transparência e a reprodutibilidade da revisão exploratória, o processo de seleção dos documentos seguiu etapas estruturadas de filtragem, partindo da identificação inicial na base de dados até a consolidação da amostra elegível, conforme esquematizado na Figura 1.

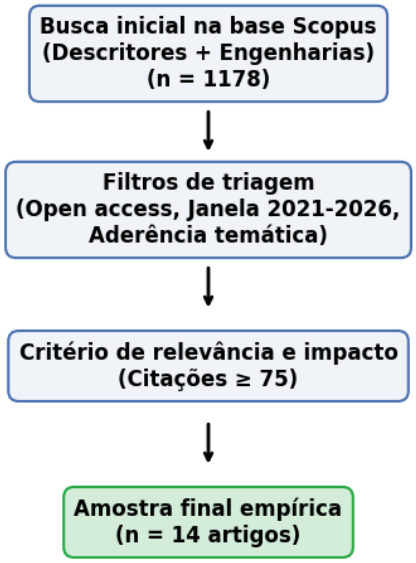

Figura 1: Fluxograma das etapas de seleção e refinamento da amostra empírica.

Como ilustrado, a aplicação sequencial dos critérios de relevância, combinada à exclusão de documentos secundários (como outras revisões sistemáticas), permitiu refinar o universo de 1178 documentos para uma amostra final de 14 artigos. Esse procedimento foi feito de modo a garantir que a análise subsequente se concentrasse exclusivamente em dados primários e experimentais de incorporação de resíduos.

Os parâmetros extraídos incluíram identificação das métricas de desempenho mecânico, menção à sustentabilidade, uso de metodologias de avaliação de impacto ambiental e a validação quantitativa dos benefícios ecológicos. Por fim, a análise dos dados foi realizada mediante estatística descritiva e síntese crítica comparativa.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Quadro 1 apresenta o mapeamento detalhado das publicações selecionadas, evidenciando a tipologia do material investigado e o escopo metodológico.

Quadro 1: Caracterização das pesquisas selecionadas e mapeamento de lacunas metodológicas.

Referência (autor, ano)	Resíduo	Foco técnico	Uso de ACV
Abdelzaher (2023)	RCD e nanoplásticos	Físico-mecânico e microestrutural	Não
Ahmed *et al.* (2021)	Rejeitos de mineração de ouro	Físico-mecânico e lixiviação de metais pesados	Sim
Charai *et al.* (2021)	Fibras vegetais de cânhamo (*Cannabis sativa*)	Físico-térmico e desempenho energético	Não
Ghorbani *et al.* (2020)	Escória de aço elétrico de aço inoxidável	Físico-mecânico e imobilização de lixiviados	Não
Golafshani *et al.* (2024)	Agregados reciclados de concreto (ARC)	Mecânico e predição via Machine Learning	Não
Honic *et al.* (2021)	RCD	Auditoria de reciclabilidade e modelagem BIM	Sim
Kul *et al.* (2023)	RCD	Físico-mecânico e microestrutural em geopolímeros	Sim
Loizou *et al.* (2021)	RCD	Mapeamento e quantificação física de resíduos	Não
Onyelowe *et al.* (2022)	Cinza volante (*fly ash*)	Mecânico e otimização por Inteligência Artificial	Sim
Ozcelikci *et al.* (2023)	RCD	Físico-mecânico e durabilidade em geopolímeros	Sim
Praburanganathan *et al.* (2022)	Resíduos de papel descartado e fibras de vidro	Físico-mecânico	Não
Resch *et al.* (2021)	RCD	Modelagem e metodologia de ACV dinâmica	Sim
Silva *et al.* (2021)	Maravalhas de madeira industrial e bio-resinas	Físico-mecânico em painéis aglomerados	Sim
Valente *et al.* (2022)	Borracha de pneus reciclados	Físico-mecânico e microestrutural	Sim

A esquematização dos dados extraídos dos 14 artigos revela o atual panorama de transição na engenharia de materiais, de modo que a hipótese inicial se cumpriu: o discurso acadêmico assimilou a necessidade da sustentabilidade, mas a prática científica da engenharia civil ainda apresenta lacunas estruturais na sua aplicação.

A partir do mapeamento, é possível inferir que há uma ampla diversidade nas matrizes de materiais investigados na construção civil. A literatura concentra esforços na valorização de subprodutos para estabilização de compósitos, dividindo-se majoritariamente entre Resíduos de Construção e Demolição (RCD), resíduos industriais e agroindustriais. A Figura 1 ilustra a distribuição percentual da tipologia de resíduos na amostra analisada.

A Tabela 1 sintetiza a frequência de abordagens metodológicas identificadas ao longo da revisão, permitindo contrapor a ambição sustentável à realidade das validações experimentais.

Tabela 1: Frequência de abordagens metodológicas nos artigos avaliados.

Critério analisado	Frequência	Percentual
Avaliação exclusiva ou central do desempenho mecânico	10	71,43%
Menção qualitativa à dimensão ambiental	14	100,00%
Uso de metodologia estruturada	8	57,14%
Confirmação quantitativa dos benefícios ambientais	5	35,71%

Os dados obtidos evidenciam que a totalidade absoluta da amostra (100,00%) faz menções qualitativas à dimensão ambiental, reiterando a importância da redução de resíduos. Contudo, o rigor dessa “consciência” demonstra-se frágil na prática, visto que a validação técnica convencional (resistência à compressão, ensaios de durabilidade e caracterização microestrutural) permanece como o eixo central inquestionável para 71,43% das investigações.

A diminuição do rigor analítico ao longo das etapas de validação dos compósitos pode ser visualizada no diagrama de fluxo a seguir (Figura 2).

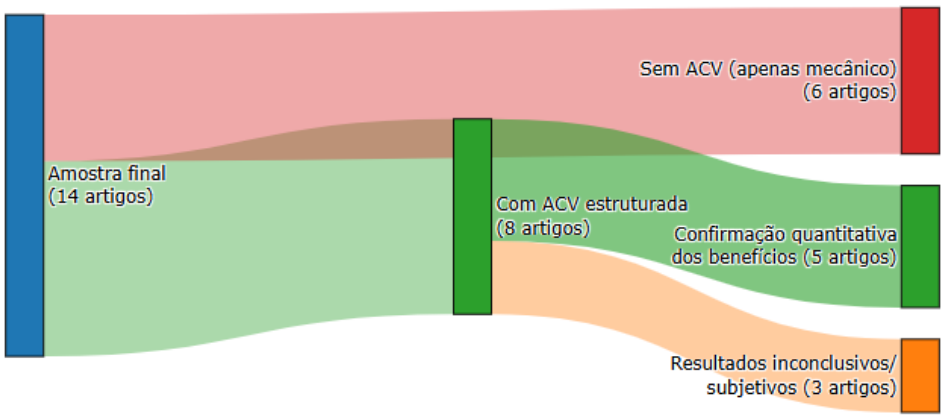

Figura 2: Diagrama de fluxo do gargalo metodológico na validação ambiental.

Em contrapartida ao discurso ambiental onipresente, apenas 57,14% dos artigos experimentais conseguiram integrar ferramentas estruturadas, como a ACV, às suas metodologias. Isso atesta que as propostas de economia circular na construção civil correm o risco de se basearem em senso comum, em vez de dados científicos sistêmicos. Quando o rigor da validação empírica é exigido, a lacuna torna-se ainda mais evidente: pouco mais de um terço das pesquisas (35,71%) realiza o balanço final de impactos para confirmar se a substituição material realmente gerou benefícios líquidos à natureza.

Mesmo no grupo restrito (57,14%) que emprega metodologias como a ACV, os resultados apontam para um cenário de extrema variabilidade metodológica. A subjetividade nas escolhas de fronteiras de sistema, alocação de cargas ambientais dos resíduos e qualidade dos dados de inventário compromete a comparabilidade das pesquisas. Diferentes escolhas subjetivas por parte dos analistas podem provocar variações drásticas nos resultados de emissões relatados, limitando o potencial dessas ferramentas para influenciar diretrizes normativas sólidas. A falta de padronização pode, em última instância, levar a conclusões acadêmicas enganosas, favorecendo a propagação de compósitos ineficientes sob um apelo visual “verde”.

Este cenário de incertezas revela uma divergência estrutural na forma como o escopo das pesquisas de novos compósitos é concebido. A perpetuação do que a literatura classifica como “sustentabilidade intuitiva” é alimentada por um ciclo de validação linear, que necessita ser substituído por uma abordagem sistêmica, conforme comparado na Figura 3.

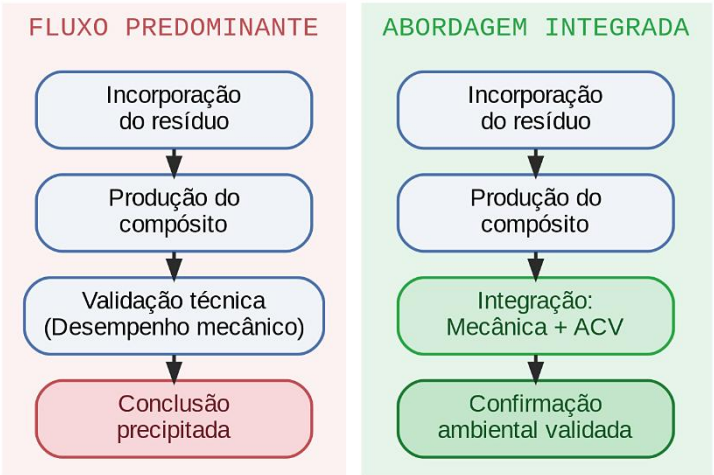

Figura 3: Comparativo entre o fluxo de validação técnica e integração metodológica.

Existe, portanto, um elo perdido entre o que se argumenta na introdução dos artigos e o que é transposto metodologicamente para os laboratórios. O desenvolvimento de novas formulações compósitas ocorre, frequentemente, descolado da quantificação energética da reciclagem. O setor da engenharia permanece profundamente enraizado em diretrizes de segurança estrutural em detrimento de uma sustentabilidade quantificável, fazendo com que a efetividade ambiental de novos materiais ecológicos permaneça, em grande parte, no campo das hipóteses não testadas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da produção científica recente revela um forte desalinhamento entre a promoção do discurso da sustentabilidade e a sua efetiva execução metodológica. Conclui-se que os números indicam uma consciência predominantemente intencional (presente em 95% dos textos), mas que falha criticamente na execução técnica padronizada, visto que pouco mais da metade utiliza a ACV e uma minoria ínfima comprova seus reais benefícios ecológicos.

Para a comunidade acadêmica, este estudo sinaliza a necessidade urgente de uma revisão dos padrões de publicação em engenharias de materiais. A sustentabilidade não pode ser tratada de forma secundária ou baseada em heurísticas visuais de reaproveitamento. É imprescindível que as pesquisas futuras desenvolvam a integração técnica-ambiental desde a concepção do experimento, inserindo as métricas de ciclo de vida com o mesmo peso decisório tradicionalmente conferido às análises mecânicas. Adicionalmente, sugere-se a formulação de protocolos normativos abertos que reduzam a subjetividade da ACV aplicada a novos materiais compósitos, garantindo transparência e acelerando a transição do setor construtivo para a economia circular.

REFERÊNCIAS

ABDELZAHER, M. A. Sustainable development goals for industry, innovation, and infrastructure: demolition waste incorporated with nanoplastic waste enhanced the physicomechanical properties of white cement paste composites. **Applied Nanoscience**, v. 13, n. 8, p. 5521–5536, 2023.

AHMED, T. et al. Development of ECO-UHPC utilizing gold mine tailings as quartz sand alternative. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 4, e100176, 2021.

CHARAI, M.; MEZRHAB, A.; KARKRI, M. Thermal insulation potential of non-industrial hemp (Moroccan cannabis sativa L.) fibers for green plaster-based building materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 292, e126064, 2021.

EBERHARDT, L. C. M.; BIRKVED, M.; BIRGISDOTTIR, H. Building design and construction strategies for a circular economy. **Architectural Engineering and Design Management**, v. 18, n. 2, p. 93–113, 2022.

GHORBANI, S. et al. Characterisation of alkali-activated stainless steel slag and blast-furnace slag cements. **Cement and Concrete Composites**, v. 143, e105230, 2023.

GHUFRAN, M. et al. Circular Economy in the Construction Industry: A Step towards Sustainable Development. **Buildings**, v. 12, n. 7, e1004, 2022.

GOLAFSHANI, E. M. et al. Modelling the compressive strength of geopolymer recycled aggregate concrete using ensemble machine learning. **Advances in Engineering Software**, v. 191, e103611, 2024.

HONIC, M. et al. Material Passports for the end-of-life stage of buildings: Challenges and potentials. **Journal of Cleaner Production**, v. 319, e128702, 2021.

KUL, A. et al. Characterization and life cycle assessment of geopolymer mortars with masonry units and recycled concrete aggregates assorted from construction and demolition waste. **Journal of Building Engineering**, v. 78, e107546, 2023.

LIU, X. et al. Mechanical performance of low-carbon ultra-high performance engineered cementitious composites (UHP-ECC) with high-volume recycled concrete powder. **Journal of Building Engineering**, v. 88, e109153, 2024.

LOIZOU, L. et al. Quantifying Advantages of Modular Construction: Waste Generation. **Buildings**, v. 11, n. 12, e622, 2021.

MIRALDO, S. et al. Advantages and shortcomings of the utilization of recycled wastes as aggregates in structural concretes. **Construction and Building Materials**, v. 298, e123729, 2021.

NOROUZI, M. et al. Circular economy in the building and construction sector: A scientific evolution analysis. **Journal of Building Engineering**, v. 44, e102704, 2021.

ONYELOWE, K. C. et al. Multi-Objective Optimization of Sustainable Concrete Containing Fly Ash Based on Environmental and Mechanical Considerations. **Buildings**, v. 12, n. 7, e948, 2022.

OZCELIKCI, E. et al. A comprehensive study on the compressive strength, durability-related parameters and microstructure of geopolymer mortars based on mixed construction and demolition waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 396, e136522, 2023.

PRABURANGANATHAN, S. et al. Force-Deformation Study on Glass Fiber Reinforced Concrete Slab Incorporating Waste Paper. **Advances in Civil Engineering**, v. 2022, n. 1, e5343128, 2022.

RESCH, E.; ANDRESEN, I.; CHERUBINI, F.; BRATTEBØ, H. Estimating dynamic climate change effects of material use in buildings—Timing, uncertainty, and emission sources. **Building and Environment**, v. 187, e107399, 2021.

SILVA, V. U. et al. Circular vs. linear economy of building materials: A case study for particleboards made of recycled wood and biopolymer vs. conventional particleboards. **Construction and Building Materials**, v. 285, e122906, 2021.

VALENTE, M. et al. Reducing the emission of climate-altering substances in cementitious materials: A comparison between alkali-activated materials and Portland cement-based composites incorporating recycled tire rubber. **Journal of Cleaner Production**, v. 333, e130013, 2022.