XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8927

Influência da geração de perdas de materiais na emissão de carbono incorporado em canteiros de obras: estudo de caso para estacas de fundação

Influence of material waste generation on embodied carbon emissions at construction sites: a case study for foundation piles

Mayara Gibosky
Universidade Federal do Rio de Janeiro|Rio de Janeiro|Brasil|mayara.gibosky@fau.ufrj.br
Lucas Rosse Caldas
Universidade Federal do Rio de Janeiro|Rio de Janeiro|Brasil|lucas.caldas@fau.ufrj.br
Tatiana Gondim do Amaral
Universidade Federal de Goiás |Goiânia| Brasil |
tatianagodim@ufg.br
Guilherme Moreira de Oliveira
Universidade Federal de Goiás |Goiânia|Brasil|guilhermemoreira@discente.ufg.br

Resumo

A ineficiência nos canteiros gera perdas de materiais que elevam o impacto ambiental do setor, sendo o objetivo deste trabalho quantificar o impacto do desperdício material e a logística de resíduos nas emissões de CO_2e de fundações por estacas hélice contínua, confrontando dados reais com projeto. A metodologia emprega a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) do "berço ao portão" (central dosadora até o canteiro, módulos A1-A5). O estudo, baseado em dados coletados via software Melius em uma obra de alto padrão, aponta que o "Carbono Invisível" das perdas representa 23,80% das emissões estruturais e o transporte de solo responde por 45,56%. Com base na unidade funcional de área construída, a intensidade real atingiu 2,28 kg CO_2e/m^2, ante 0,94 kg CO_2e/m^2 em projeto, evidenciando que o monitoramento digital é essencial para a precisão dos inventários frente às estimativas teóricas do projeto.

Palavras-chave: Carbono incorporado. Gestão de resíduos. ACV. Canteiro de obras.

Abstract

Construction site inefficiency generates material waste that increases the environmental impact of the sector. The objective of this work is to quantify the impact of material waste and waste logistics on CO_2e emissions of continuous flight auger piled foundations, confronting real data against design estimates. The methodology employs a cradle-to-gate Life Cycle Assessment (LCA) (from the ready-mix plant to the construction site, modules A1-A5). The study, based on data collected via Melius software in a high-end construction project, shows that the "Invisible Carbon" from waste represents 23.80% of the foundation's structural emissions, while soil transport accounts for 45.56%. Based on the functional unit of built area, the real intensity reached 2.28 kg CO_2e/m^2, compared to 0.94 kg CO_2e/m^2 in the design estimates, proving that digital monitoring is essential to ensure inventory accuracy relative to theoretical design estimates.

Keywords: Embodied carbon. Waste management. LCA. Construction site.

Como citar:
GIBOSKY, M.; OLIVEIRA, G. M.; AMARAL, T. G.; CALDAS, L. R. Influência da geração de resíduos na emissão de carbono incorporado em canteiros de obras: estudo de caso para estacas de fundação. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21., 2026, Goiânia. **Anais...** Goiânia: ANTAC, 2026.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8927

INTRODUÇÃO

O setor da construção civil responde por aproximadamente 34% das emissões globais associadas à energia e processos industriais, com as emissões de carbono incorporadas totalizando cerca de 2,9 gigatoneladas anuais. No cenário brasileiro, a ineficiência nos processos de canteiro é crítica: estima-se que entre 10% e 30% dos materiais adquiridos sejam desperdiçados antes do uso efetivo, o que não apenas gera impactos econômicos diretos, mas acarreta uma emissão redundante de CO_2e, pois cada tonelada de entulho exige a produção e o transporte de material virgem adicional para compensação [1].

A urgência de políticas de descarbonização exige que o setor minimize o chamado *Carbono Upfront* que *são* as emissões liberadas antes mesmo da ocupação do edifício. À medida que as normas de desempenho (como a ABNT NBR 15575) aumentam a eficiência operacional das edificações, o impacto ambiental dos materiais e da execução (Módulos A1 a A5) torna-se a parcela dominante do ciclo de vida [2,3].

No entanto, o Módulo A5 (Processo de Construção) permanece como uma variável negligenciada nas avaliações tradicionais, onde perdas invisíveis em fundações e estruturas elevam drasticamente o *Material Waste Rate (MWR),* que em estudos internacionais já atinge picos de 25,6% [4]. Estudos de Silva et al. [5] verificaram um aumento de 12,65 % em comparação com dados de projeto e obra, quando comparados os sistemas de fundação, estrutura e vedações de uma edificação residencial de alto padrão. Isto acontece pois são dados difíceis de serem coletados, em especial por questões de desconfiança por parte das construtoras ou segredo industrial [5].

Diante desse cenário, emergem duas lacunas críticas: uma teórica, pela escassez de inventários com dados empíricos de canteiro para o Módulo A5, e outra prática, decorrente da invisibilidade do desperdício de materiais abaixo do nível do solo. A partir dessa problemática, define-se a seguinte questão de pesquisa: até que ponto a invisibilidade das perdas em módulos de fundações compromete as metas de descarbonização setoriais? Investigar esse problema permite entender como a variação entre o consumo de material projetado e o efetivamente consumido em estacas de fundação impacta as emissões de CO_2.

Para responder a esse questionamento, o presente trabalho adota como objeto de estudo um empreendimento de alto padrão em Goiânia-GO. A análise concentra-se em estacas hélice contínua, tipologia na qual a variabilidade geométrica e as falhas de execução costumam ser subestimadas. Por meio do monitoramento em tempo real via plataforma Melius [6], quantifica-se como o desperdício de massa e a logística de transporte de resíduos se refletem no aumento das emissões. Assim, o objetivo geral é quantificar o impacto do desperdício de concreto e aço, além da logística de remoção de resíduos (Módulos A1 a A5), nas emissões de carbono, comparando os dados reais medidos em obra com os parâmetros teóricos de projeto.

Com isso, a pesquisa apresenta duas contribuições fundamentais para o estado da arte: (1) o uso de dados primários de perdas de materiais reais de canteiro, superando a dependência de coeficientes estáticos da literatura; e (2) a avaliação do impacto

ambiental no sistema de fundações, elemento raramente considerado em estudos de ACV apesar de sua alta variabilidade de consumo.

MÉTODO

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso aplicado de natureza quantitativa, fundamentado nas diretrizes normativas da ABNT NBR ISO 14040 [7] e da EN 15978 [8], para a avaliação do desempenho ambiental de edifícios, com foco na emissão de carbono. O objetivo desta ACV é avaliar o impacto ambiental de aquecimento global decorrente das etapas de produção, transporte e construção (Módulos A1 a A5, de acordo com a EN 15978) de estacas hélice continua, com foco na análise especificamente nas perdas dos dois principais materiais estruturais do sistema: o concreto usinado e o aço das armaduras, de uma edificação localizada em Goiânia - GO. A sistematização da coleta de dados primários foi viabilizada pelo uso do software Melius, plataforma de gestão de canteiro que permitiu a digitalização das Fichas de Verificação de Serviço (FVS) e o monitoramento de insumos em tempo real.

No que tange à definição de escopo e à ACV, adotou-se como unidade funcional 1 m² de área construída total da edificação, correspondente a uma área total de 39.801,08 m². Essa escolha metodológica justifica-se para alinhar o inventário de emissões do subsistema de infraestrutura profunda à escala global do edifício, permitindo a comparabilidade direta com os padrões da literatura científica e de mercado para o ambiente construído.

Para o cálculo dos indicadores de intensidade de carbono da fundação, as somatórias das emissões totais do subsistema foram normalizadas pela área construída total da edificação. Dessa forma, embora o levantamento de dados quantifique o volume de concreto m³ e a massa de aço (kg) consumidos nas estacas, o indicador final de intensidade de carbono da fundação é normalizado pela área construída total, dividindo o somatório das emissões totais do subsistema pela área em metros quadrados do empreendimento.

As fronteiras do sistema foram delimitadas abrangendo as Módulos A1 a A5, compreendendo o ciclo “do berço ao canteiro de obras” *(Cradle-to-Gate + Construction process)*. O Inventário do Ciclo de Vida (ICV) considerou a extração e fabricação de materiais (A1-A3), o transporte rodoviário dos insumos (A4), com distâncias calculadas a partir da localização de usinas e fornecedores locais, e os processos de execução e desperdícios no canteiro (A5). Para a quantificação física das perdas materiais no canteiro, inseriu-se o indicador MWR, permitindo calibrar o inventário. Previu-se também uma análise de sensibilidade confrontando o cenário de projeto (0% de perda), o cenário real monitorado e os índices teóricos tradicionais da literatura.

A avaliação do Impacto de Ciclo de Vida (AICV) foi realizada a partir do método EN 15804:2019 para a categoria de aquecimento global (em kg CO_2e) (para os casos onde foi utilizado dados de EPDs e do Ecoinvent). Para avaliar a incerteza existente no processo decorrente da variação das fontes de dados secundários, estruturou-se uma

análise comparativa baseada em dois cenários analíticos distintos: o cenário balizado pelo Sistema de Desempenho Ambiental da Construção (SIDAC) e o cenário balizado por Declarações Ambientais de Produto (EPD) nacionais de domínio público. Para o concreto de 25 MPa, adotou-se um Fator de Emissão (FE) de 202,78 kg CO_2e/m^3, obtido a partir de uma EPD setorial desenvolvida pela Sustencon [10], confrontado com os limites do SIDAC [11], que variam de 200,00 a 306,40 kg CO_2e/m^3. Para o aço CA-50, considerou-se a variação entre o SIDAC [11] (0,42 kg CO_2e/kg a 1,06 kg CO_2e/kg) e a base de dados do Banco Nacional de Declarações Ambientais de Produto do IBICT [9] (1,88 kg CO_2e/kg) de um fabricante nacional. Os processos de movimentação local e transporte de resíduos foram complementados com dados secundários extraídos da base Ecoinvent (versão v3.12) [12], a partir do conjunto de dados *"transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5"*, utilizando-se o inventário regionalizado para o contexto geográfico brasileiro.

O objeto de estudo é um empreendimento de alto padrão localizado na cidade de Goiânia - GO, sendo o escopo desta pesquisa restrito à análise do seu sistema de fundações profunda. As estacas hélice contínua da fundação submetidas à avaliação de impacto ambiental possuem diâmetro nominal de 40 cm e profundidades variando de 12 a 24 metros. Ademais, os blocos de coroamento e vigas baldrame foram desconsiderados por limitações fronteiriças do escopo, cujo foco residiu exclusivamente no fluxo executivo subterrâneo. O inventário físico abrangeu o monitoramento integral de todas as estacas executadas, composta por 72 estacas hélice contínua, nessa tipologia na obra, totalizando o mapeamento detalhado do consumo real e das perdas de concreto usinado e armaduras de aço CA-50 ao longo de toda a fase de perfuração e concretagem.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No cenário brasileiro, a ineficiência nos processos de canteiro é crítica: estima-se que entre 10% e 30% dos materiais adquiridos sejam desperdiçados antes do uso efetivo, o que não apenas gera impactos econômicos diretos, mas acarreta uma emissão redundante de CO_2, pois cada tonelada de entulho. A análise dos resultados fundamentou-se na integração dos dados primários de campo, monitorados em tempo real pela plataforma Melius [9], com planilhas eletrônicas para a quantificação das emissões. A caracterização do empreendimento de alto padrão revelou que a infraestrutura profunda composta por 72 estacas hélice contínua com diâmetro de 40 cm, é um dos principais pontos de desperdício de massa. A digitalização das FVS permitiu o cálculo preciso das discrepâncias entre o consumo de materiais projetado e o efetivamente executado no canteiro. Os cálculos da emissão de carbono consideraram o carbono incorporado nos materiais, as perdas de canteiro e o transporte logístico (Módulo A4). Os dados indicam que a perda de concreto nas estacas exige a produção e o transporte de material virgem adicional para compensar o desperdício, gerando emissões redundantes de CO_2e.

A análise dos dados primários revela uma discrepância crítica entre o consumo projetado e o executado na etapa de infraestrutura do empreendimento. Tais índices

confirmam que a fundação atua como um ponto crítico ambiental, conforme corroborado por estudos pregressos na literatura nacional [4,5], que apontam a imprevisibilidade geotécnica e o alto consumo de cimento como agravantes climáticos na infraestrutura. A variabilidade geológica e as falhas operacionais geraram um consumo excedente de 49,76 m³ de concreto, representando uma emissão direta de aproximadamente 10,1 toneladas de CO_2e decorrentes exclusivamente da ineficiência produtiva (Módulo A5).

No sistema de estacas de 40 cm, o volume projetado de 134,74 m³ resultou em um consumo efetivo de 184,50 m³, consolidando um excedente de massa de 36,93%. No caso do aço, a variação foi de 10,00%, com o consumo real de 4.446,42 kg superando os 4.042,20 kg previstos. Este cenário gerou um MWR médio elevado, com picos de desperdício atingindo 83,00% em eventos específicos de concretagem, onde o "Carbono Invisível" (emissões de materiais não incorporados à estrutura) atingiu picos de até 3.472,00 kg CO_2e por evento. Essas taxas de perdas reais encontradas neste estudo superam significativamente os coeficientes teóricos da literatura de mercado (como SINAPI e TCPO, que preveem perdas fixas de 10% a 20%), explicitando que os indicadores teóricos tradicionais tendem a subestimar drasticamente o desperdício oculto no solo.

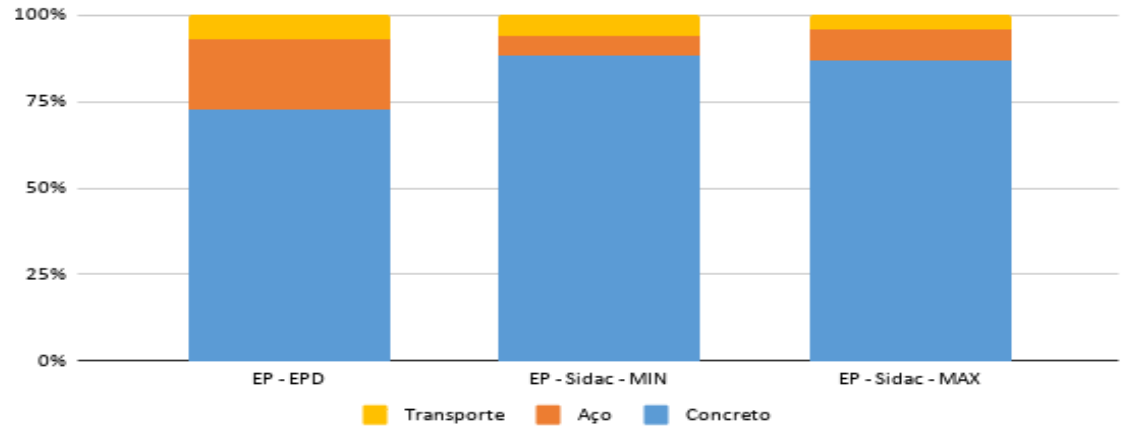
Na Módulo A4 (transporte de insumos), observou-se que a necessidade de compensar o desperdício de materiais elevou a pegada de carbono logística em 33,41% (de 2.658,15 kg CO_2e para 3.546,30 kg CO_2e). Contudo, o maior impacto ambiental provém da Módulo A5 (gerenciamento e logística de resíduos locais). O monitoramento dos quantitativos da construtora registrou a retirada de 3.766,00 m³ de solo e entulho destinados ao bota-fora, gerando um esforço logístico de 301.280,00 t.km. Esta atividade, frequentemente omitida em inventários de projeto, adicionou 41.275,36 kg CO_2e ao balanço real.

No total consolidado na base EPD, a emissão real da fundação atingiu inicialmente 49.319,04 kg CO_2e (valor 31,24% superior aos 37.580,47 kg CO_2e estimados inicialmente) e, com a adição obrigatória do transporte do solo escavado, saltou para um impacto total de 90.594,40 kg CO_2e, configurando um aumento total de 141,07% em relação ao planejado. Essa forte variação explica o fato de que quase metade da pegada de carbono da fundação provenha exclusivamente do deslocamento de massa para fora do ciclo produtivo, conectando o impacto material direto ao severo esforço de transporte do Módulo A5. Coerentemente com a unidade funcional adotada (1 m² de área construída para uma área total de 39.801,08 m²), o indicador de intensidade real saltou de 0,94 kg CO_2e/m^2 (cenário de projeto) para 2,28 kg CO_2e/m^2 (cenário real de obra). Este resultado demonstra que o "Carbono Invisível" não reside apenas no material desperdiçado (A1-A3), mas principalmente no espaço logístico de remoção de resíduos (A5), que isoladamente representou 45,56% das emissões totais dos módulos.

Ao analisar apenas a intensidade dos materiais via EPD, sem o transporte de resíduos, o indicador real foi de 1,24 kg CO_2e/m^2, podendo chegar a 1,60 kg CO_2e/m^2 no cenário SIDAC-MAX. Percebe-se que o uso de diferentes dados de modelagem exerce influência direta, apresentando uma variação de 29,00% entre as bases adotadas. Na

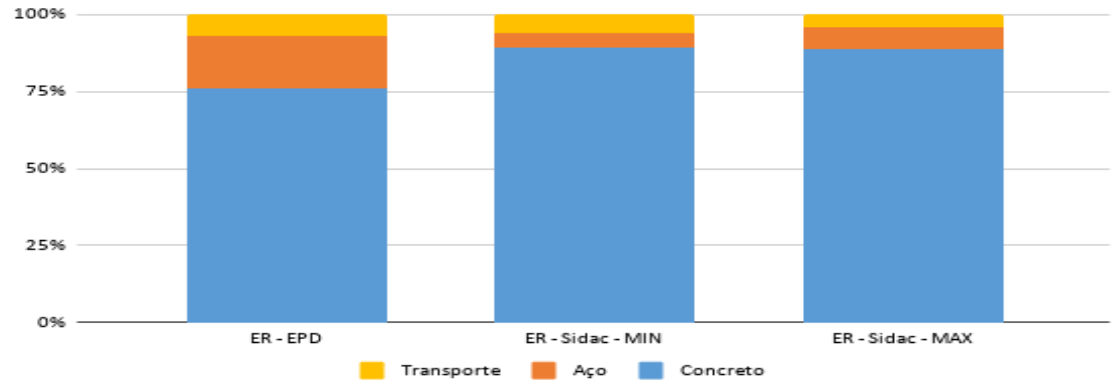
Figura 1 é apresentado o perfil de emissão dos materiais consumidos nas estacas considerando os diferentes tipos de dados para os dados de projeto (EP). Enquanto na Figura 2 é apresentado o perfil para os dados de obra (ER). Ressalta-se que a semelhança visual entre as Figuras 1 e 2 decorre da manutenção da proporcionalidade de consumo entre os insumos, embora os valores absolutos de ER sejam significativamente superiores.

Figura 1: Perfil da Emissão de Projeto (EP)



Fonte: os autores

Figura 2: Perfil da Emissão de Obra (ER)



Fonte: os autores

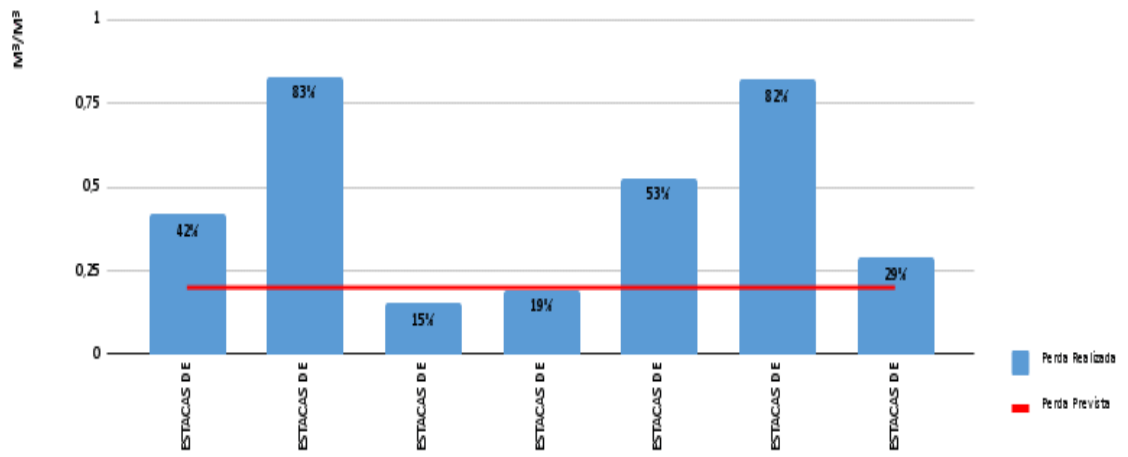
Percebe-se que para ambos os casos, EP e ER, o concreto é o material de maior contribuição emissiva total, o que se deve ao fato de ser o componente mais consumido em massa e por apresentar a maior perda absoluta. Desta forma, a emissão para a sua produção é o principal *hotspots* de materiais, o que se confirma de maneira homogênea para as duas bases de dados, indo ao encontro de resultados da literatura [5]. Estudos nacionais clássicos de ACV encontraram variações expressivas no impacto ambiental do concreto devido a imprevistos executivos ou à necessidade de alteração do tipo de fundação durante a obra. Contudo, na escala interna do processo executivo de canteiro (Módulo A5 isolada), o impacto logístico da remoção de solo e entulho revelou-se o principal *hotspot* ambiental global da etapa, representando 45,56% das

emissões reais totais (41.275,36 kg CO_2e). Este dado, extraído dos quantitativos da construtora, expõe a fragilidade dos inventários de projeto que normalmente não consideram esse fluxo de resíduos.

Sob a ótica da Economia Circular, a magnitude deste impacto sugere a urgência de estratégias de circularidade local, como o reuso de resíduos de concreto excedente para pavimentação provisória ou a compensação de terraplenagem interna, evitando perdas mais significativas. Para o caso das EPDs, o aço aumenta sua participação relativa no total de emissão por ter um fator de emissão (FE) consideravelmente maior (1,88 kg CO_2e/kg) em relação ao do SIDAC (0,42 kg CO_2e/kg a 1,06 kg CO_2e/kg).

A variação nos resultados, decorrente da escolha entre as bases de dados (EPD vs. SIDAC), destaca uma camada de incerteza científica valiosa para o setor. Embora a base EPD apresente fatores mais conservadores, a divergência para os limites ressalta que a padronização de indicadores nacionais é fundamental para políticas públicas de descarbonização. Contudo, a análise de sensibilidade discutida a seguir é ilustrada na Figura 3 demonstra que a variabilidade executiva (com picos de desperdício de até 83,00%) exerce uma dominância maior sobre o resultado final do que a incerteza da base de dados, reforçando que o controle de processos em tempo real é mais eficaz para a mitigação de impacto do que apenas a especificação técnica de insumos.

Figura 3: Perda de Concreto - Estacas 40



Fonte: os autores

A digitalização dos processos via plataforma Melius [6] ou o uso de outra ferramenta digital similar consolida-se, portanto, como uma estratégia de gestão da mitigação de impacto ambiental tão relevante quanto a especificação de materiais de baixa intensidade de carbono. Essa rastreabilidade assegura a conformidade com as diretrizes das normas, transformando a eficiência operacional do canteiro em uma estratégia corporativa de descarbonização mensurável e auditável. Consequentemente, torna-se estatisticamente possível traçar metas realistas e

confiáveis de descarbonização caso seja feito um diagnóstico preciso das emissões que realmente ocorrem na obra.

A análise da variabilidade demonstrou que, enquanto o orçamento previa uma perda constante de 20%, a realidade de campo apresentou oscilações críticas, com picos de desperdício de 83% e 82% em algumas das estacas concretadas, conforme detalhado no comportamento gráfico da Figura 3. Nesses eventos, o “carbono invisível” atingiu picos de até 3.472,00 kg CO_2e por concretagem, demonstrando que a falha na precisão executiva sobrecarrega o inventário da Módulos A5 de forma não linear e severa.

CONCLUSÃO

Conclui-se que a confiabilidade dos inventários de emissões e o avanço real rumo às metas de *Net Zero* dependem fundamentalmente da precisão executiva. O estudo de caso avaliado, mostrou que que o "carbono invisível" das perdas representou 23,80% das emissões dos materiais e o transporte de solo respondeu a 45,56%.

Práticas do tipo *Environmental, Social and Governance* (ESG) do setor devem, obrigatoriamente, integrar a eficiência produtiva à sua matriz de gestão, tratando o "carbono invisível" como uma variável crítica para a conformidade técnica e para a mitigação de impactos ambientais na construção civil.

Como limitação desta pesquisa, aponta-se o recorte analítico restrito estritamente ao subsistema estrutural de infraestrutura profunda (fundações) de um único empreendimento residencial multifamiliar de alto padrão. Para desenvolvimentos e trabalhos futuros, recomenda-se a expansão deste método de monitoramento digital automatizado para os demais módulos de superestrutura (como lajes e pilares), bem como a modelagem quantitativa de cenários práticos de economia circular local, avaliando o potencial de reuso do solo escavado e do concreto excedente de canteiro na pavimentação interna de vias provisórias ou outras aplicações.

AGRADECIMENTOS

A CAPES, CNPQ e FAPERJ e a Construtora participante que cedeu os dados utilizados na pesquisa.

DECLARAÇÃO DE NÃO USO DE IA

Durante a preparação deste artigo, foram utilizadas as ferramentas Gemini, Grammarly e LanguageTool para a tradução, revisão e melhoria de coesão. Após a utilização das ferramentas, os autores revisaram e editaram o conteúdo conforme necessário e assumem total responsabilidade pelo conteúdo do artigo publicado.

REFERÊNCIAS

[1] IEA; UNEP. **2019 Global status report for buildings and construction:** Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector. Paris: International Energy Agency; United Nations Environment Programme, 2019. Disponível em: https://globalabc.org/resources/publications/2019-global-status-report-buildings-and-construction. Acesso: 9 mar. 2026

[2] ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2022**. São Paulo: ABRELPE, 2022. Disponível em: https://www.abrema.org.br/. Acesso : 11 mar. 2026.

[3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais — Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2021

[4] HASSELSTEEN, L.; OTOVIC, A. P.; BIRGISDÓTTIR, H.; KANAFANI, K. Benchmarking Potential Construction Waste Streams and Their Climate Impact: Life Cycle Assessment-Based Targets for Strategic Planning of Construction Processes. **Sustainable Development**, Londres, v. 33, n. 1, p. 1-15, 2025. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/sd.70350. Acesso: 15 mar. 2026.

[5] SILVA, M. C. F.; CALDAS, L. R.; FERREIRA, L. J. Impactos ambientais da construção civil: Estudo de caso de uma edificação residencial multifamiliar de alto padrão no Brasil. In: **Encontro Latino-Americano e Europeu sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis (euroELECS)**, v. 6, n. 1, p. 1–10, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.46421/euroelecs.v6.7646. Acesso em: 10 mar. 2026.

[6] MELIUS. **Plataforma de Gestão de Canteiro de Obras**. Versão 2.0. Goiânia, 2025. Disponível em: https://melius.com.br. Acesso: 15 mar. 2025.

[7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

[8] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 15978**: Sustainability of construction works — Assessment of environmental performance of buildings — Calculation method. Brussels: CEN, 2011

[9] IBICT – INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida:** Banco Nacional de Declarações Ambientais de Produto (DAP). Brasília: IBICT, 2024. Disponível em: ibict.br. Acesso em: 8 mar. 2026.

[10] SUSTENCON. **Declaração Ambiental de Produto (EPD) setorial:** Concreto usinado no mercado brasileiro. São Paulo: EPD Brasil, 2023. Disponível em: epdbrasil.com.br. Acesso: 11 mar. 2026.

[11] SIDAC – SISTEMA DE INVENTÁRIOS DO CICLO DE VIDA. **Base nacional de inventários do ciclo de vida**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/ee/sidac. Acesso: 10 mar. 2026.

[12] **Ecoinvent database**. Version 3.9. Zurich: Ecoinvent Centre, 2025. Disponível em: https://www.ecoinvent.org/. Acesso em: 9 mar. 2026.

[13] SALTELLI, A.; RANNOU, P.; RATO, M.; ALVES, I.; CAMPOLONGO, F.; CARIBONI, J.; BECKER, W. **Global Sensitivity Analysis:** The Primer. Londres: John Wiley & Sons, 2008.