AVALIAÇÃO DO CARBONO INCORPORADO EM ABRIGOS DE ÔNIBUS COM O USO DA FERRAMENTA CECARBON: PROPOSTAS PARA INTERVENÇÕES SUSTENTÁVEIS

ASSESSMENT OF EMBODIED CARBON IN BUS SHELTERS USING CECARBON: PROPOSALS FOR SUSTAINABLE INTERVENTIONS

Ana Carolina Utsch Correa [1]; Diogenes Carvalho Viana [2]; Luiza Carvalho Tereza [3]; Nádia Lima Sousa Madureira Silva [4]; Bruno Henrique Martins Moreira [5].

[1]Mestre | ana.correa@infraestrutura.mg.gov.br | SEINFRA-MG | Belo Horizonte, Brasil; [2]Mestre | diogenes.viana@infraestrutura.mg.gov.br | SEINFRA-MG | Belo Horizonte, Brasil; [3]Mestre | luiza.tereza@infraestrutura.mg.gov.br | SEINFRA-MG | Belo Horizonte, Brasil; [4]Engenheira Ambiental | nadia.silva@infraestrutura.mg.gov.br | SEINFRA-MG | Belo Horizonte, Brasil; [5]Engenheiro Ambiental | bruno.moreira@infraestrutura.mg.gov.br | SEINFRA-MG | Belo Horizonte, Brasil.

Resumo:
O setor da construção é um dos maiores responsáveis pelas emissões globais de gases de efeito estufa, com o carbono incorporado ganhando reconhecimento crescente como fator crítico no impacto ambiental. Este estudo avalia a aplicação da CECarbon em um projeto real de infraestrutura pública — a instalação de abrigos de ônibus em concreto armado, representativo de intervenções urbanas simples e recorrentes. A análise quantificou emissões significativas de carbono incorporado (283,04 $kgCO_2e/m^2$), predominantemente concentradas nas fases estruturais e de fundações, corroborando a importância de estratégias de mitigação, como a incorporação de adições minerais, a substituição parcial de agregados por reciclados e a adoção de sistemas pré-moldados em obras similares. A CECarbon mostrou-se eficaz na geração de dados detalhados sobre emissões, apoiando decisões sustentáveis. Sua adoção sistemática por órgãos públicos pode representar um passo estratégico rumo à descarbonização do setor da construção, alinhando-se a metas internacionais climáticas. O estudo ressalta a importância da quantificação do carbono incorporado, mesmo em projetos de pequena escala, para ampliar a conscientização e orientar políticas que promovam infraestrutura urbana sustentável, especialmente em países em desenvolvimento.

Palavras-chave:
Carbono incorporado; emissões de gases de efeito estufa; pegada de carbono; construção civil; CECarbon.

Abstract:
The construction sector is one of the largest contributors to global greenhouse gas emissions, with embodied carbon increasingly recognized as a critical factor in environmental impact. This study evaluates the application of the CECarbon in a real public infrastructure project — the installation of reinforced concrete bus shelters, representative of simple and recurring urban interventions. The analysis quantified significant embodied carbon emissions (283.04 $kgCO_2e/m^2$) predominantly concentrated in the structural and foundation phases, reinforcing the importance of mitigation strategies such as the incorporation of mineral additions, the partial replacement of natural aggregates with recycled ones, and the adoption of precast systems in similar projects. The CECarbon proved effective in generating detailed emissions data to support sustainable decision-making. Its systematic adoption by public agencies could represent a strategic step toward the decarbonization of the construction sector, aligning with international climate goals. This study highlights the relevance of embodied carbon quantification, even in small-scale projects, as a means to raise awareness and guide policies that promote sustainable urban infrastructure, especially in developing countries.

Keywords:
Embodied carbon; greenhouse gas emissions; carbon footprint; civil construction; CECarbon.

1. INTRODUÇÃO

A crise climática global tem colocado a construção civil no centro das discussões sobre sustentabilidade e emissões de gases de efeito estufa (GEE). O setor permanece como um dos mais intensivos em consumo de energia e emissões: em 2023, foi responsável por aproximadamente 32% do consumo global de energia e cerca de 34% das emissões globais de CO_2 relacionadas à energia e aos processos operacionais, totalizando cerca de 9,8 $GtCO_2$ e no ano (UNEP e GlobalABC, 2025). Esse cenário torna-se ainda mais crítico diante da projeção de que, até 2050, cerca de 60% das edificações previstas no mundo ainda estarão por ser construídas, o que amplia de forma significativa o impacto potencial de decisões sustentáveis no setor da construção (UNEP, 2024).

Tradicionalmente, as políticas de mitigação climática no setor concentram-se na redução do carbono operacional, através de melhorias em eficiência energética e uso de fontes renováveis. No entanto, cresce a relevância do carbono incorporado, aquele relacionado às etapas de extração, produção, transporte, montagem e descarte de materiais ao longo do ciclo de vida da edificação (Zhang *et al*., 2024). Ao longo da última década, pesquisas foram realizadas para caracterizar a intensidade de materiais e o carbono incorporado em nível de edifício. Para tratar adequadamente essa problemática, é necessário adotar abordagens integradas de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), conforme definido nas normas NBR ISO 14040 e NBR ISO 14044, além de seguir as diretrizes específicas para produtos e serviços da construção contidas na ISO 21930 (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b; ISO, 2017).

A ACV fornece uma estrutura robusta para quantificar os impactos ambientais associados aos edifícios, permitindo identificar as etapas da obra com maior emissão e direcionar estratégias de mitigação (Barbhuiya e Das, 2023). Uma análise mais granular e fundamentada do uso de materiais e das emissões de carbono incorporado é essencial para identificar com precisão os pontos críticos de intervenção, possibilitando estratégias mais eficazes de mitigação das emissões e contribuindo para o cumprimento das metas climáticas globais. A integração dessa metodologia com tecnologias digitais como o *Building Information Modeling* (BIM) tem demonstrado grande potencial para otimizar projetos desde sua concepção, facilitando a coleta e o tratamento de dados (Li, 2023).

Neste cenário, a ferramenta CECarbon - Calculadora de consumo energético e emissão de carbono na construção civil surge como uma solução inovadora para apoiar o diagnóstico ambiental de obras civis. Desenvolvida pelo Sindicato da Indústria da Construção Civil de Grandes Estruturas no Estado de São Paulo (SindusCon-SP), em parceria com Secretaria Nacional de Habitação (SNH) do Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR), e a *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ) GmbH, com apoio do Ministério Federal da Cooperação Econômica e do Desenvolvimento (BMZ) da Alemanha, a ferramenta foi projetada para calcular as emissões de carbono incorporado com base em insumos, etapas construtivas e dados orçamentários reais (SINDUSCON-SP, 2024).

Importante destacar que a CECarbon opera com base na lógica da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), segundo os parâmetros definidos na ISO 21930, mas limita-se à fase A do ciclo de vida que abrange desde a extração das matérias-primas até a etapa de construção (módulos A1 a A5) (SINDUSCON-SP, 2024). Dessa forma, não contempla as fases de uso (B), fim de vida útil (C) e os benefícios além do ciclo (D), o que delimita seu escopo, mas ainda assim oferece dados cruciais para decisões sustentáveis nas fases iniciais do projeto e execução.

Diante desse cenário, iniciativas públicas vêm ganhando protagonismo na incorporação de critérios de sustentabilidade em obras de infraestrutura. Em Minas Gerais, o Governo do Estado aderiu à campanha global Race to Zero, comprometendo-se com a neutralidade de carbono até 2050. A Secretaria de Estado de Infraestrutura, Mobilidade e Parcerias de Minas Gerais (SEINFRA), responsável pela coordenação de obras públicas estaduais, tem buscado alinhar seus projetos às diretrizes do Plano Estadual de Ação Climática (PLAC-MG), incorporando práticas de avaliação ambiental em seus processos. A aplicação da ferramenta CECarbon em uma obra contratada pela SEINFRA representa um esforço pioneiro nesse sentido, ao proporcionar dados objetivos sobre o

carbono incorporado em infraestrutura pública e apoiar a formulação de políticas mais alinhadas com a agenda climática.

Este artigo tem como objetivo analisar a aplicação da ferramenta CECarbon no diagnóstico e intervenção sustentável de uma obra pública real. A metodologia contempla a organização dos dados em etapas compatíveis com a lógica da ACV, a consolidação e conversão dos quantitativos e a posterior geração automatizada do relatório de emissões, com vistas a subsidiar a formulação de políticas públicas e práticas profissionais alinhadas à agenda da descarbonização no setor da construção civil.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. O DESAFIO DAS EMISSÕES DE GEE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O sistema climático da Terra é significativamente afetado pelas emissões de GEE provenientes de atividades antrópicas. Em particular, as construções, que consomem recursos naturais e energia em grande escala, contribuindo para a poluição do ar e emissões de carbono. Essas emissões impulsionam os desafios atuais das mudanças climáticas e do aquecimento global, que são agravados pelo aumento das concentrações de gases como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), conforme relatado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US EPA). Nesse contexto, a Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (NOAA) registrou um aumento na concentração de CO_2 atmosférico, de 407 para 409 partes por milhão (ppm), em janeiro de 2019 (Lan, Tans e Thoning, 2023).

A distinção entre carbono operacional e incorporado é fundamental para o avanço de políticas eficazes. Enquanto o primeiro pode ser mitigado com melhorias em eficiência energética e tecnologias renováveis, o segundo depende de decisões de projeto, especificação de materiais e logística, o que exige ferramentas analíticas mais sofisticadas (Mohebbi *et al.*, 2023).

2.2. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) E A SUSTENTABILIDADE EM OBRAS CIVIS

A metodologia de ACV, normatizada pela ISO 14040 e adaptada ao setor da construção pela ISO 21930, tem sido amplamente aplicada para quantificar os impactos ambientais ao longo de todas as fases do ciclo de vida da edificação (ISO, 2017; ABNT, 2009a). A ACV permite mensurar, de forma estruturada, as emissões associadas aos materiais e processos desde o berço (extração) até o túmulo (destinação final), fornecendo dados essenciais para escolhas sustentáveis (Barbhuiya e Das, 2023).

A ISO 21930 (2017) estrutura o ciclo de vida da construção civil em módulos normalizados, agrupados conforme as seguintes fases:

Fase A (Módulos A1–A5) – Refere-se ao produto e construção, incluindo extração e processamento de matérias-primas (A1), transporte até a fábrica (A2), processos de fabricação (A3), transporte até o canteiro (A4) e atividades de construção e instalação (A5);

Fase B (Módulos B1–B7) – Relaciona-se ao uso do edifício, cobrindo manutenção, reparo, substituições e consumo de energia e água durante sua vida útil;

Fase C (Módulos C1–C4) – Diz respeito ao fim da vida útil, englobando demolição, transporte de resíduos, tratamento e disposição final;

Fase D – Considera os benefícios e cargas além do ciclo de vida, como o potencial de reciclagem ou recuperação de energia de componentes ao final da vida útil.

A ferramenta CECarbon, utilizada neste estudo, foca nos módulos A1 a A5, ou seja, contabiliza apenas as emissões associadas à produção dos materiais e ao processo construtivo, não abrangendo ainda as fases de uso, descarte ou benefícios pós-uso (B, C e D) (SINDUSCON-SP, 2024).

A análise das etapas A1 a A5, que correspondem à extração e processamento dos materiais até a entrega no canteiro de obras, é amplamente reconhecida como fundamental para a avaliação dos impactos ambientais em edificações. Dixit *et al*. (2012) ressalta que grande parte das emissões e do consumo energético associados à construção está concentrada nessas etapas, justificando a priorização de intervenções sustentáveis nesse momento do ciclo. Nesse contexto, mesmo que a ferramenta CECarbon foque exclusivamente nos módulos A1 a A5, ela oferece uma base sólida e efetiva para a tomada de decisões sustentáveis no início do processo construtivo, onde as escolhas feitas podem ter maior impacto na redução das emissões totais do edifício. Assim, o uso da CECarbon se mostra relevante para apoiar práticas mais conscientes e sustentáveis na construção civil, mesmo sem contemplar as fases posteriores de uso, descarte e benefícios pós-uso.

Vários estudos destacam a eficácia da ACV quando integrada a ferramentas digitais como o BIM, que permite extrair dados geométricos e quantitativos diretamente dos modelos tridimensionais e alimentá-los em plataformas de cálculo ambiental. Essa integração proporciona precisão e a confiabilidade dos resultados, como também viabiliza a avaliação dos impactos ambientais desde as fases iniciais do projeto, promovendo decisões sustentáveis e fundamentadas ao longo do ciclo de vida da edificação (Li, 2023).

2.3. FERRAMENTAS DE QUANTIFICAÇÃO DE CARBONO INCORPORADO

Com o avanço da digitalização, surgiram diversas ferramentas ao redor do mundo para análise de carbono incorporado, como o OneClick LCA (OneClick LCA, 2025), EC3 (Building Transparency, 2025), Tally (Tally LCA, 2025) e CECarbon (SINDUSCON-SP, 2025). Dentre elas, a CECarbon se destaca por seu foco específico em obras civis, ao possibilitar a integração de dados de materiais e processos construtivos com fatores de emissão provenientes de bases nacionais. Além disso, trata-se de uma ferramenta gratuita, que tem sido utilizada em programas de financiamento governamental, como o Minha Casa Minha Vida (SINDUSCON-SP, 2024).

Essa relevância da CECarbon está associada à sua base de dados consolidada, construída a partir de fontes que refletem a realidade brasileira, tais como EPDs (Declarações Ambientais de Produto fornecidas por fabricantes), o SIDAC (Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção), o banco Ecoinvent adaptado ao Brasil, além de dados extraídos da literatura técnica especializada (SINDUSCON-SP, 2024). Essa combinação de informações assegura maior precisão na estimativa das emissões associadas a diferentes materiais e processos, incluindo o transporte e o uso de combustíveis.

Segundo o relatório do UNEP (2023), ferramentas de avaliação de carbono devem ser acessíveis, auditáveis e padronizadas para garantir transparência e comparabilidade entre projetos. A CECarbon atende a esses critérios ao permitir que engenheiros e projetistas tomem decisões com base em indicadores ambientais objetivos, como a emissão de CO_2 equivalente por metro quadrado construído.

2.4. ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO E APLICAÇÕES REAIS

Estudos de caso recentes demonstram que as ferramentas de ACV podem reduzir em até 30% o carbono incorporado de edificações, especialmente quando associadas à substituição de materiais convencionais por alternativas de menor impacto, como madeira engenheirada, bambu e concreto com menor teor de clínquer (Amarasinghe *et al*., 2025). Além disso, práticas como reutilização de componentes, modularização e design para desmontagem têm se mostrado eficazes para reduzir os impactos na fase de fim de vida (Zhang *et al*., 2024).

Ainda assim, existem barreiras significativas para a adoção ampla dessas práticas, como a escassez de dados específicos por região, a falta de normatização para a consideração do carbono incorporado em licitações públicas e o desconhecimento por parte dos profissionais (Zhang *et al*., 2024).

3. MÉTODOS

3.1. TIPO DE PESQUISA

Este estudo se caracteriza como uma pesquisa aplicada, de natureza quantitativa, com abordagem exploratória. Adota-se o método de estudo de caso, focando na aplicação da ferramenta CECarbon para quantificar as emissões de carbono incorporado em uma obra pública real: a construção dos abrigos de ônibus destinados a proteger os usuários contra chuva, sol e outras intempéries durante a espera pelo transporte coletivo, contratada pelo Governo do Estado de Minas Gerais. A análise foi conduzida com base nos dados fornecidos pelo orçamento da obra e realizada de forma detalhada, considerando tanto os tipos de materiais empregados quanto as principais etapas construtivas (como fundações, estrutura, cobertura e acabamentos), permitindo identificar os componentes com maior contribuição para as emissões totais.

Os abrigos em questão foram projetados pelo renomado arquiteto Oscar Niemeyer. A área total está distribuída entre um abrigo de 56 m^2, três abrigos de 80 m^2, e dois abrigos maiores, com 819 m^2 e 1463 m^2, que, além da função de abrigo, incluem também passarelas de ligação com os edifícios Minas e Gerais, que compõem o conjunto da Cidade Administrativa de Minas Gerais. A Figura 1 ilustra o resultado final de um dos abrigos menores já concluídos.



Figura 1: Abrigos de ônibus com 80 m².
Fonte: os autores (2025).

3.2. COLETA E ORGANIZAÇÃO DOS DADOS

Os dados utilizados neste estudo foram extraídos diretamente da planilha orçamentária oficial da obra, a qual continha informações detalhadas sobre os serviços executados, insumos aplicados e respectivos quantitativos. Para viabilizar a importação e análise pela ferramenta CECarbon, os dados foram reorganizados segundo a estrutura analítica padronizada da plataforma. Essa estrutura contempla as seguintes etapas construtivas: serviços preliminares, fundações, estrutura, vedações, revestimentos, pintura, cobertura, pavimentação e infraestrutura, instalações prediais, consumo de energia elétrica, consumo de combustível, fretes gerais e transporte de resíduos.

Para evitar duplicidades e garantir a integridade das informações, foi elaborada uma planilha de apoio que consolidou os insumos por etapa construtiva, utilizando códigos padronizados e unidades de medida compatíveis com a estrutura da ferramenta CECarbon. Nessa planilha, cada item orçamentário foi caracterizado de acordo com a etapa construtiva correspondente e associado ao material equivalente previsto no banco de dados da CECarbon. As unidades de medida também foram ajustadas para assegurar compatibilidade com o sistema.

Em seguida, uma segunda planilha foi criada para buscar automaticamente os dados consolidados da planilha anterior, somando os quantitativos por tipo de material e por etapa da obra. Essa

organização sistematizada facilitou o posterior lançamento manual das informações na plataforma CECarbon.

A ferramenta CECarbon, desenvolvida para auxiliar na quantificação de emissões de carbono na construção civil, utiliza uma base de dados adaptada para o Brasil, composta por fatores de emissão associados aos principais materiais e processos construtivos (SINDUSCON-SP, 2024). A inserção dos dados seguiu a estrutura das etapas mencionadas, permitindo a análise detalhada das emissões por fase da obra e otimizando o processo de quantificação do carbono incorporado.

3.3. GERAÇÃO E ANÁLISE DO RELATÓRIO DE EMISSÕES

Após o preenchimento completo dos dados, a ferramenta CECarbon gerou automaticamente um relatório detalhado das emissões de carbono incorporado da obra, apresentando os resultados em toneladas de CO_2 equivalente (tCO_2e). Esse relatório permitiu identificar os principais insumos e etapas construtivas responsáveis pelas maiores emissões, fornecendo uma base técnica para a proposição de estratégias de mitigação, como a substituição de materiais por alternativas de menor impacto ambiental e a otimização dos processos executivos da obra.

3.4. FLUXOGRAMA DO PROCESSO METODOLÓGICO

A Figura 2, apresenta-se um fluxograma esquemático que ilustra o processo metodológico adotado neste estudo:

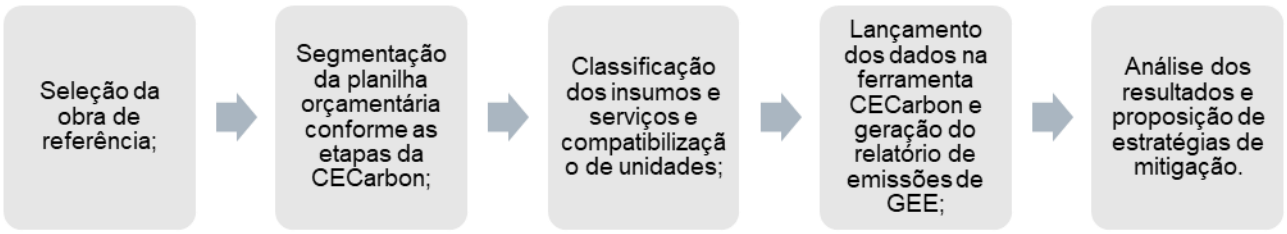

Figura 2: Fluxograma das etapas adotadas.
Fonte: os autores (2025).

Este fluxograma resume as etapas sequenciais do processo, desde a seleção da obra até a análise final dos resultados obtidos com a ferramenta CECarbon.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. EMISSÕES TOTAIS DE CARBONO INCORPORADO DA OBRA ANALISADA

A aplicação da ferramenta CECarbon à obra pública de abrigos de ônibus com estrutura simples, predominantemente composta por concreto armado, resultou em uma emissão total de 729,68 tCO_2e, distribuídas sobre uma área construída de 2.578,00 m^2. Essa configuração resulta em uma intensidade média de carbono incorporado de 283,04 $kgCO_2e/m^2$.

Embora o resultado obtido esteja abaixo dos valores de referência globais para o carbono incorporado inicial (A1–A5) em edificações convencionais — que variam entre 550 e 978 $kgCO_2e/m^2$, com média de 775 $kgCO_2e/m^2$, segundo o programa *Building for Climate Change* do governo da Nova Zelândia (2024) —, ele é representativo para estruturas de pequeno porte, como abrigos de ônibus. Essa diferença esperada em função da tipologia construtiva reforça a importância de contabilizar o carbono incorporado mesmo em obras de escala reduzida, como infraestruturas urbanas de apoio, nas quais as escolhas de materiais e técnicas construtivas exercem influência significativa sobre as emissões totais do ciclo de vida.

4.2. ETAPAS CONSTRUTIVAS MAIS EMISSORAS

A análise detalhada das emissões por etapa construtiva, conforme dados da CECarbon (Tabela 1), revela que as etapas de estrutura (310,86 tCO_2e; 42,68% do total) e fundações (269,90 tCO_2e; 37,00% do total) concentram quase 80% das emissões totais. Essas etapas correspondem às fases em que são utilizados os materiais com maior pegada de carbono, notadamente o concreto dosado em central (35 MPa e 25 MPa) e o aço para armaduras, que sozinhos representam cerca de 75% das emissões de GEE atribuídas aos materiais (Tabela 2).

Essa correlação reforça o papel crítico desses materiais e processos na pegada ambiental da construção, confirmando os achados de Meyer (2021) sobre o impacto do concreto e seus derivados em estruturas de pequeno e médio porte.

Etapa Construtiva	Emissões (tCO_2e)	Intensidade ($kgCO_2e/m^2$)	% do Total
Serviços Preliminares (Transporte de resíduos)	1,2092	0,47	0,17%
Fundações (Concreto e Aço)	269,7321	104,63	36,97%
Estrutura (Concreto)	310,8631	120,58	42,60%
Vedações (Areia e Cimento)	59,9907	23,27	8,22%
Revestimentos (Areia e Argamassa)	2,1266	0,82	0,29%
Esquadrias e Vidro (Aço e Vidro)	13,7372	5,33	1,88%
Pintura (Tinta)	3,7034	1,44	0,51%
Cobertura (Telha de Fibrocimento)	0,2724	0,11	0,04%
Pavimentação e Infraestrutura (Brita, Asfalto e Concreto)	27,9812	10,85	3,83%
Instalações prediais (Cabos, Eletrodutos e Tubos)	16,9715	6,58	2,33%
Consumo de combustível (Caminhos e retroescavadeira)	21,7382	8,43	2,98%
Fretes Geral (Fretes de Materiais)	0,6676	0,26	0,09%
Transporte de Resíduos (Transporte de resíduos)	0,6831	0,27	0,09%
Total	729,68	283,04	100%

Tabela 1 – Emissões de carbono incorporado por etapa construtiva.
Fonte: os autores (2025).

4.3. MATERIAIS COM MAIOR CONTRIBUIÇÃO PARA AS EMISSÕES

Conforme demonstrado na Tabela 2, as emissões de carbono estão distribuídas entre diversos componentes. No entanto, ao considerar os materiais utilizados, fica evidente que o concreto e outros materiais cimentícios são os principais responsáveis pela maior parcela dessas emissões:

a) Concreto dosado em central 35 MPa: 294,31 tCO_2e (40,54% do total dos materiais);
b) Aço: 164,80 tCO_2e (22,56%);
c) Concreto dosado em central 25 MPa: 85,72 tCO_2e (11,75%);
d) Cimento CP II-E: 63,96 tCO_2e (8,77%).

Estes dados evidenciam que o foco em mitigação deve priorizar a redução do uso e o aprimoramento da eficiência desses materiais, especialmente em componentes estruturais.

Fonte	Dados de atividade (quantidade)	Unidade do dado de atividade	Fator de emissão de GEE ($kgCO_2e$/unidade)	Fator de consumo energético (MJ/unidade)	Consumo Energético Total (MJ)	Emissões de GEE Totais (tCO_2e)
Concreto dosado em central 35 MPa	787,76	m^3	262,01	1.331,96	2.244.385,22 (28,22%)	294,31 (40,54%)
Aço	155,14	t	1.900,00	30.000,00	2.489.948,85 (31,30%)	164,80 (22,56%)
Concreto dosado em central 25 MPa	279,75	m^3	173,81	886,99	673.840,41 (8,47%)	85,72 (11,75%)
Cimento CP II-E	68,42	t	649,67	2.932,38	384.846,00 (4,84%)	63,96 (8,77%)
Concreto dosado em central (Genérico)	42,23	m^3	229,27	1.179,19	114.952,78 (1,45%)	14,94 (2,05%)
Cimento (Genérico)	14,71	t	654,53	2.989,97	80.698,93 (1,01%)	12,84 (1,76%)
Esquadrias de aço	5.850,00	kg	1,95	30,00	175.500,00 (2,21%)	11,41 (1,56%)
Madeira compensada	31,79	m^3	0,00	0,00	117.626,70 (1,48%)	8,27 (1,13%)
Eletroduto de PVC	789,64	m	7,82	51,80	40.803,30 (0,51%)	6,17 (0,85%)
Cabos (fiação)	23.819,34	m	0,25	3,40	80.885,75 (1,02%)	5,95 (0,82%)

Tabela 2 – Os dez materiais/serviços com maior emissão de GEE (SINDUSCON-SP, 2024).
Fonte: os autores (2025).

4.4. POTENCIAIS ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO PARA ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO

A literatura indica caminhos eficazes para reduzir o carbono incorporado nas etapas críticas da construção. O uso de cinzas volantes e escórias como materiais cimentícios suplementares (SCMs) pode reduzir em 20–30 % ou mais o carbono incorporado na produção de concreto, ao substituir parte do cimento Portland, além de trazer benefícios mecânicos e de durabilidade (Firdous e Singh, 2021). O uso de agregados reciclados provenientes da reciclagem de resíduos da construção civil também contribui para a diminuição da extração de matérias-primas naturais e redução das emissões de carbono (Salgado e Silva, 2022). Por fim, a padronização e industrialização de elementos pré-moldados vêm ganhando destaque por possibilitar maior controle de qualidade, menor desperdício de materiais e redução do tempo de execução, o que resulta em menor impacto ambiental, especialmente em obras com estruturas repetitivas, como abrigos urbanos (Oliveira e Cristino, 2024).

Além dos ganhos ambientais, as estratégias de mitigação para estruturas em concreto armado também apresentam benefícios financeiros substanciais ao longo do ciclo de vida das obras. A substituição parcial de cimento Portland por materiais cimentícios suplementares (MCS), como escória de alto-forno e cinzas volantes, permite uma significativa redução de custos porque estes subprodutos industriais possuem custo unitário inferior ao do clínquer e estão amplamente disponíveis no mercado regional, além de melhorarem algumas propriedades técnicas do concreto, como durabilidade e resistência a ataques químicos, reduzindo despesas futuras com manutenção e reparos. Estudos recentes indicam que essa substituição pode reduzir em até 7,4% o custo inicial de materiais e contribuir para redução de 37,8% nas emissões de carbono incorporado (Asif *et al*., 2024). Além disso, o uso de agregados reciclados e pré-fabricação de elementos padronizados reduz os custos logísticos e de transporte de materiais virgens e otimiza o tempo de execução das obras, resultando em economia de mão de obra e menor exposição a aumentos de preços de insumos tradicionais. Em perspectiva de ciclo de vida, essas medidas podem gerar economia de até 21% nos custos totais de um edifício em 50 anos, com destaque para a redução de até 76% nos custos de manutenção e intervenções corretivas (Abushanab *et al*., 2023). Assim, as soluções sustentáveis de engenharia reduzem simultaneamente o impacto ambiental e os custos globais dos projetos de infraestrutura.

4.5. BARREIRAS E PERSPECTIVAS PARA A INSTITUCIONALIZAÇÃO DO BAIXO CARBONO EM OBRAS URBANAS

Governos no geral, devem assumir um papel de liderança nas ações de descarbonização do setor da construção civil, especialmente no que diz respeito aos edifícios públicos. Isso inclui o planejamento criterioso da escala dessas construções, a formulação de políticas públicas que incentivem o uso de tecnologias construtivas de baixo carbono e o estímulo à pesquisa e à adoção de novos materiais com maior durabilidade. Entretanto, apesar da viabilidade técnica das estratégias de descarbonização, sua implementação ainda enfrenta desafios relevantes, como a ausência de normatização nacional específica, a falta de exigências ambientais em editais públicos e o limitado conhecimento técnico dos profissionais envolvidos, conforme destacado pelo Desafios para a Cadeia do Cimento (Caldas *et al*., 2024).

Nesse contexto, a institucionalização do carbono incorporado como critério técnico obrigatório em licitações e manuais de infraestrutura urbana, conforme recomendado pelo WorldGBC (2021), surge como um caminho promissor para impulsionar mudanças estruturais no setor. Ferramentas como a CECarbon, ao oferecerem dados auditáveis e rastreáveis sobre emissões, podem servir de base confiável para apoiar essas futuras exigências e garantir maior transparência e efetividade nas decisões públicas.

4.6. LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Algumas limitações devem ser destacadas:

a) A ausência de um banco de dados nacional abrangente e atualizado sobre fatores de emissão específicos para os diversos materiais utilizados no setor, o que frequentemente exige o uso de médias internacionais ou estimativas pouco precisas;
b) Carência de normativas que obriguem a consideração do carbono incorporado em projetos e licitações de obras públicas;
c) Necessidade de capacitação técnica entre profissionais da administração pública e dos setores de projeto e execução da construção civil, para interpretação e aplicação eficiente dos dados e estratégias.

Essas limitações não comprometem a utilidade da ferramenta CECarbon, ao contrário, reforçam a necessidade de institucionalizar a Avaliação do Ciclo de Vida como prática rotineira no planejamento e execução de obras civis, promovendo maior eficiência ambiental e responsabilidade institucional.

5. CONCLUSÕES

Este estudo avaliou a aplicação da ferramenta CECarbon em um caso real de obra pública, voltado à instalação de um abrigo de ônibus em concreto armado, estrutura representativa de intervenções urbanas simples e recorrentes. A análise demonstrou que, mesmo em obras de pequena escala, o carbono incorporado pode atingir valores significativos — 283,04 $kgCO_2e/m^2$ — com impactos concentrados nas fases estruturais e de fundações.

A principal contribuição deste trabalho consiste em demonstrar que estratégias amplamente reconhecidas na literatura como eficazes para mitigar o carbono incorporado são plenamente aplicáveis mesmo em obras padronizadas e de pequeno porte, como os abrigos urbanos. As intervenções sugeridas dialogam diretamente com os estudos analisados e incluem a substituição parcial do clínquer por adições minerais — como pozolanas, escórias de alto-forno e cinzas volantes —, a incorporação de agregados reciclados e a adoção de sistemas pré-moldados industrializados. Essas soluções, além de tecnicamente viáveis, promovem reduções significativas nas emissões de CO_2 sem comprometer o desempenho estrutural das construções. A integração dessas práticas ao processo construtivo, por meio da fabricação de componentes fora do canteiro, da seleção criteriosa de materiais e do planejamento do design com foco em eficiência térmica e funcionalidade, pode ampliar ainda mais os benefícios ambientais. Ressalta-se, contudo, que tais estratégias ainda não foram adotadas no caso analisado, uma vez que o foco inicial da pesquisa foi a quantificação das

emissões de carbono incorporado, com o objetivo de fornecer subsídios técnicos para futuras decisões de projeto mais sustentáveis.

A ferramenta CECarbon mostrou-se eficaz para a quantificação das emissões de carbono incorporado e permitiu embasar decisões técnicas orientadas pela sustentabilidade. Sua adoção sistemática por órgãos públicos pode representar um passo estratégico rumo à descarbonização do setor da construção, alinhando-se a diretrizes internacionais como o Acordo de Paris e as metas do WorldGBC.

Conclui-se que a quantificação do carbono incorporado, mesmo em obras pouco complexas, é essencial para ampliar a conscientização dos impactos ambientais da construção civil e subsidiar políticas públicas que promovam a sustentabilidade urbana. A padronização de soluções de baixo carbono para mobiliário e infraestrutura urbana representa uma oportunidade concreta para a redução de emissões em escala, especialmente em países em desenvolvimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009a.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009b.

ABUSHANAB, A.; VIMONSATIT, V. Cost-effectiveness of reinforced recycled aggregate concrete structures with fly ash and basalt fibres under corrosion: A life cycle cost analysis. **Buildings**, v. 15, n. 7, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings15071167.

AMARASINGHE, I. *et al*. Paving the way for lowering embodied carbon emissions in the building and construction sector. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 27, p. 1825–1843, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s10098-024-03023-6.

ASIF, U.; MEMON, S. A. Interpretable predictive modeling, sustainability assessment, and cost analysis of cement-based composite containing secondary raw materials. **Construction and Building Materials**, v. 473, 140924, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140924.

BARBHUIYA, S.; DAS, B. B. Life Cycle Assessment of construction materials: Methodologies, applications and future directions for sustainable decision-making. **Case Studies in Construction Materials**, v. 19, e02326, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02326.

BIONOVA Ltda. **One Click LCA: Building Life Cycle Assessment & Carbon Calculation Tool**. Disponível em: https://www.oneclicklca.com/. Acesso em: 03 ago. 2025.

BUILDING TRANSPARENCY. EC3 – **Embodied Carbon in Construction Calculator**. Disponível em: https://buildingtransparency.org/ec3/. Acesso em: 03 ago. 2025.

CALDAS, L. R.; SILVA, L. C.; SIQUEIRA, T. P. L.; TOLEDO FILHO, R. D. **Descarbonização e Política Industrial: Desafios para a Cadeia do Cimento**. Working Paper DIP-BR 05/2024, Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, abril de 2025. Disponível em: repositório do IE-UFRJ. Acesso em: 4 ago. 2025.

DIXIT, M. K. *et al*. Need for an embodied energy measurement protocol for buildings: A review paper. **Renewable and sustainable energy reviews**, 2012, 16(6), 3730-3743.

FIRDOUS, M., e SINGH, B. Supplementary cementitious materials in concrete and associated structural and environmental benefits: A review. In **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science** (Vol. 889, No. 1, p. 012077). IOP Publishing, 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 21930:2017** — Sustainability in buildings and civil engineering works — Core rules for environmental product declarations of construction products and services. Geneva, 2017.

KIERAN TIMBERLAKE / AUTODESK / SPHERA. **Tally LCA – Life Cycle Assessment Software for Revit**. Disponível em: https://tallylca.com/. Acesso em: 03 ago. 2025.

LAN, X.; TANS, P.; THONING, K. **Trends in globally-averaged CO_2 determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements**. Version Monday, 05-May-2025 16:38:58 MDT. DOI: https://doi.org/10.15138/9N0H-ZH07.

LI, J. Carbon emission assessment during construction phase based on Building Information Model (BIM) and Life Cycle Assessment (LCA**). In: International Conference on Functional Materials and Civil Engineering**, 2023. DOI: https://doi.org/10.54254/2755-2721/23/20230622.

MEYER, C. The greening of the concrete industry. **Cement and Concrete Composites**, v. 114, p. 103763, 2021. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103763.

MOHEBBI, G. *et al*. Comparative analysis of the whole life carbon of three construction methods of a UK-based supermarket. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 44, n. 3, p. 355–375, 2023. DOI: https://doi.org/10.1177/01436244231161070.

NEW ZEALAND. **Understanding potential avoided upfront carbon emissions through strengthening of seismically-deficient buildings**. Wellington: Ministry of Business, Innovation & Employment, Building for Climate Change Programme, 2024. Disponível em: https://www.building.govt.nz/assets/Uploads/getting-started/building-for-climate-change/understanding-potential-avoided-upfront-carbon-emissions-through-strengthening-of-seismically-deficient-buildings.pdf. Acesso em: 4 ago. 2025.

OLIVEIRA, P. R. e COSTA, M. G. Agregados reciclados na construção civil: impactos ambientais e viabilidade técnica. **Revista Brasileira de Engenharia**, v. 31, n. 2, p. 112-128, 2023.

OLIVEIRA, P. P. e CRISTINO, M. F. Estruturas pré-moldadas de concreto: redução de resíduos, sustentabilidade, viabilidade econômica e otimização de prazos. **REMUNOM**, 2024, 12(3), 1-14.

SALGADO, F. A. e SILVA, F. A. Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review. **Journal of Building Engineering**, 2024, 52, 104452.

SINDUSCON-SP. **Inventário de obra: relatório metodológico da ferramenta CECarbon**. São Paulo, 2024.

SINDUSCON-SP. **CECarbon – Avaliação de carbono incorporado na construção civil**. Disponível em: https://cecarbon.cbic.org.br/. Acesso em: 03 ago. 2025.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Building materials and the climate: Constructing a new future**. Nairobi, 2023.

UNEP. **2023 Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations – Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector**. Nairobi, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.59117/20.500.11822/45095. Acesso em: maio 2025.

UNEP; GLOBAL ALLIANCE FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION (GlobalABC). **Not just another brick in the wall: The solutions exist – Scaling them will build on progress and cut emissions fast**. Global Status Report for Buildings and Construction 2024-2025. UNEP/GlobalABC, 2025.

WORLD GREEN BUILDING COUNCIL (WORLDGBC). **Bringing Embodied Carbon Upfront: Coordinated action for the building and construction sector to tackle embodied carbon**. 2021.

ZHANG, Y. *et al*. Systematic Review of Embodied Carbon Assessment and Reduction in Building Life Cycles: An Integrated Approach to Resilience and Sustainability. **NIST Special Publication 1324.** Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2024. DOI: https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1324.