

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Manoel Policiano Tertolino da Silva

**EMISSIONES DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM EDIFICAÇÕES NO BRASIL:
ANÁLISE DA RESPONSABILIDADE DO EMPREENDEDOR COM BASE NO CICLO
DE VIDA E EM ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO**

Juiz de Fora

2026

Manoel Policiano Tertolino da Silva

**EMISSIONES DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM EDIFICAÇÕES NO BRASIL:
ANÁLISE DA RESPONSABILIDADE DO EMPREENDEDOR COM BASE NO CICLO
DE VIDA E EM ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO**

Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Kopschitz Xavier Bastos

Juiz de Fora

2026

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Silva, Manoel Policiano Tertolino da.

Emissões de gases de efeito estufa em edificações no Brasil: análise da responsabilidade do empreendedor com base no ciclo de vida e em estratégias de mitigação / Manoel Policiano Tertolino da Silva. -- 2026.

98 p.

Orientador: Pedro Kopschitz Xavier Bastos

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2026.

1. Construção civil. 2. Emissões de gases de efeito estufa. 3. Ciclo de vida. 4. GHG Protocol. 5. Mitigação ambiental. I. Bastos, Pedro Kopschitz Xavier, orient. II. Título.

Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil

Manoel Policiano Tertolino da Silva

Título: "EMISSIONES DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM EDIFICAÇÕES NO BRASIL: ANÁLISE DA RESPONSABILIDADE DO EMPREENDEDOR COM BASE NO CICLO DE VIDA E EM ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO"

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Aprovada em 13/02/2026

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. PEDRO KOPSCHITZ XAVIER BASTOS - Orientador e Presidente da Banca - (UFJF)

Prof. Dr. LEOPOLDO EURICO GONÇALVES BASTOS - Membro Titular Externo (UFRJ)

Profa. Dra. ALINE SARMENTO PROCÓPIO - Membro Titular Interno - (UFJF)

Juiz de Fora, 16/02/2026.



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Kopschitz Xavier Bastos, Professor(a)**, em 20/02/2026, às 09:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Aline Sarmento Procopio, Professor(a)**, em 24/02/2026, às 16:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **2878039** e o código CRC **1D452A2D**.

Documento assinado digitalmente
gov.br LEOPOLDO EURICO GONÇALVES BASTOS
Data: 26/02/2026 19:43:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Juiz de Fora e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, por possibilitar oportunidades a todos os profissionais que desejam estudar e se desenvolver com contribuições concretas para as gerações atuais e futuras.

A todos os seres que participaram e auxiliaram em algum momento durante esse processo de ensino, aprendizagem e construção do conhecimento técnico.

E por fim, ao Criador que possibilita inspirar frases motivacionais como a seguir: Provérbios 4: 23 Tenha cuidado com o que você pensa, pois a sua vida é dirigida pelos seus pensamentos. 24 Nunca fale mentiras, nem diga palavras perversas. 25 Olhe firme para a frente, com toda a confiança; não abaixe a cabeça, envergonhado. 26 Pense bem no que você vai fazer, e todos os seus planos darão certo. 27 Evite o mal e caminhe sempre em frente; não se desvie nem um só passo do caminho certo.

RESUMO

O setor da construção civil desempenha papel relevante na economia brasileira, ao mesmo tempo em que contribui de forma significativa para as emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas à produção de materiais, à execução das obras e à operação das edificações. Nesse contexto, esta dissertação analisa as emissões de GEE em edificações no Brasil a partir de uma abordagem baseada no ciclo de vida, articulada à classificação por escopos do GHG Protocol. É dada ênfase na identificação do grau de influência e de responsabilização do construtor/empreendedor sobre as emissões. A pesquisa possui caráter exploratório e analítico, fundamentada em revisão bibliográfica e documental, com sistematização de dados da literatura nacional e internacional, bem como de bases públicas brasileiras. Como resultados, são discutidas faixas indicativas de emissões de CO₂e por metro quadrado de edificações, a distribuição das emissões ao longo das fases do ciclo de vida e sua correspondência com os escopos 1, 2 e 3 do GHG Protocol. Com base nessa análise, propõe-se um modelo conceitual de mitigação e responsabilização das emissões, que considera a adoção de soluções construtivas mitigadoras e mecanismos de compensação. O estudo contribui para o debate sobre instrumentos de gestão e políticas públicas voltadas à redução das emissões de GEE em edificações no contexto brasileiro.

Palavras-chave: Construção civil; Edificações; Emissões de gases de efeito estufa; Ciclo de vida; GHG Protocol; Mitigação ambiental.

ABSTRACT

The civil construction sector plays an important role in the Brazilian economy while also contributing significantly to greenhouse gas (GHG) emissions associated with material production, construction activities, and building operation. In this context, this dissertation analyzes GHG emissions from buildings in Brazil based on a life cycle perspective, articulated with the scope-based classification of the GHG Protocol, with emphasis on identifying the degree of influence and responsibility of builders and developers. The research adopts an exploratory and analytical approach, grounded in bibliographic and documentary review, with systematization of data from national and international literature as well as Brazilian public databases. The results discuss indicative ranges of CO_{2e} emissions per square meter of buildings, the distribution of emissions across life cycle stages, and their correspondence with GHG Protocol scopes 1, 2, and 3. Based on this analysis, a conceptual model for emission mitigation and responsibility is proposed, incorporating the adoption of mitigating construction solutions and compensation mechanisms, aiming to balance environmental effectiveness with market acceptability in the construction sector. The study contributes to the discussion on management instruments and public policies aimed at reducing GHG emissions in buildings within the Brazilian context.

Keywords: Civil construction; Buildings; Greenhouse gas emissions; Life cycle; GHG Protocol; Environmental mitigation.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida

A1–A5 / B1–B7 / C1–C4 / D – Módulos do ciclo de vida segundo a EN 15978

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

BEN – Balanço Energético Nacional)

CBIC – Câmara Brasileira da Indústria da Construção

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

COP – Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima

EFDB – Emission Factor DataBase (Base de dados de fatores de emissão do IPCC)

EN – European Norm (Norma Europeia)

EPD – Environmental Product Declaration (Declaração Ambiental de Produto)

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

FGV – Fundação Getulio Vargas

GEE – Gases de Efeito Estufa

GHG Protocol – Greenhouse Gas Protocol

GWP – Global Warming Potential (Potencial de Aquecimento Global)

ICE – Inventory of Carbon and Energy

IEA – International Energy Agency (Agência Internacional de Energia)

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

ISO – International Organization for Standardization

MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações

MRV – Mensuração, Relato e Verificação

ONU – Organização das Nações Unidas

PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

SIDAC – Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção

SIRENE – Sistema de Registro Nacional de Emissões

UE – União Europeia

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change

VUP – Vida Útil de Projeto

WBCSD – World Business Council for Sustainable Development

WRI – World Resources Institute

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1 - Contextualização	14
1.2 - Justificativas.....	16
1.3 - Objetivos geral e específicos.....	16
1.3.1 - Objetivo geral.....	16
1.3.2 - Objetivos específicos	17
1.4 - Estrutura do trabalho	17
1.5 - Questões orientadoras de pesquisa.....	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1 - Buscas bibliográficas e breve apanhado sobre o tema.....	19
2.2 - Mudanças climáticas e o setor de construção civil	24
2.2.1 - Potenciais causas das mudanças climáticas.....	24
2.2.2 - Dióxido de carbono equivalente.....	27
2.2.3 - Participação do setor da construção civil nas emissões de GEE	28
2.3 - Pegada de carbono em edificações.....	29
2.3.1 - Conceito de pegada de carbono.....	29
2.3.2 - Fatores de emissão e fontes de dados para construção civil.....	30
2.4 - Limitações e desafios na elaboração de inventários de carbono de edificações....	34
3. EMISSÕES DE GEE DE EDIFICAÇÕES – ABORDAGEM VIA ETAPAS DO EMPREENHIMENTO E PROTOCOLO GHG.....	36
3.1 - Emissões ao longo do ciclo de vida das edificações.....	36
3.2 - Emissões de acordo com o <i>GHG Protocol</i> aplicado a edificações	38
3.2.1 - <i>GHG Protocol</i> no mercado brasileiro de construção civil	40
3.2.2 - Emissões das edificações e o fator tempo	44

4. MODELOS DE MITIGAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS	47
4.1 - Compensação ambiental	47
4.2 - Soluções construtivas eficientes.....	48
4.3 - Imposto ambiental.....	50
4.4 - Comércio de emissões.....	51
4.5 - Selos de qualidade ambiental de edificações como referência para soluções mitigadoras de emissões de GEE	54
5. METODOLOGIA.....	57
6. RESULTADOS	59
6.1 - Abordagem das emissões de acordo com o ciclo de vida e com o GHG Protocol	59
6.2 - Distribuição das emissões de CO ₂ e ao longo do ciclo de vida de edificações no contexto brasileiro.....	62
6.3 - Critérios de certificação do Selo Azul+ aplicáveis a mecanismo de mitigação de emissões	66
6.4 - Identificação das emissões com o empreendedor	68
6.5 - Pegada de carbono embutido em edificações – estimativa por unidade funcional (m ²)	72
6.6 - Vantagens e desvantagens dos modelos de mitigação abordados.....	75
6.7 - Sugestão de mecanismo de mitigação/compensação	79
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Composição do ar seco.	25
Figura 2 – Agrupamento de módulos e fases do ciclo de vida de uma edificação de acordo com a norma BS EN 15978:2011.	38
Figura 3 – Categorias de emissões segundo o WRI/WBCSD (2004).	39
Figura 4 – Escopos do GHG Protocol segundo a cadeia de valor de uma empresa.	40
Figura 5 – Níveis de abrangência de inventários GEE aplicáveis à construção de edificações	44
Figura 6 – Emissões acumuladas de GEE x tempo de vida útil para diferentes tipos de paredes.	45
Figura 7 – Evolução das normas francesas de desempenho térmico de edificações e as proporções entre energia operacional e energia incorporada.	46
Figura 8 - Compensação ambiental direta – ilustração esquemática.....	48
Figura 9 - Esquema simplificado de soluções construtivas eficientes.....	50
Figura 10 - Ilustração simplificada do imposto ambiental recorrente.....	51
Figura 11 - O mercado de crédito de carbono.	52
Figura 12 – Distribuição das emissões por Escopos.....	66
Figura 13 - Grau de influência do construtor sobre decisões para mitigação de emissões de GEE	72
Figura 14 – Fluxograma do mecanismo de mitigação sugerido	81

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Fontes bibliográficas relevantes para a pesquisa (da mais recente até a menos recente).	21
Quadro 2 - Critérios do Selo Casa Azul de responsabilidade direta do construtor e mitigadores de CO ₂ - Fase de obra	67
Quadro 3 - Critérios do Selo Casa Azul de responsabilidade direta do construtor e mitigadores de CO ₂ - Fase operacional	67
Quadro 4 – Classificação das ações do construtor quanto ao grau de influência na tomada de decisões para mitigação de emissões de GEE durante o ciclo de vida da edificação, por escopo.	69
Quadro 5 - Análise do grau de influência do construtor sobre mitigação de emissões.....	70
Quadro 6 - Elementos estruturantes do modelo de tributação.....	80
Quadro 7 – Descrição do modelo de mitigação e emissões de GEE.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Número de publicações encontradas em busca por termos.	19
Tabela 2 - Principais GEE e sua conversão em CO _{2e}	28
Tabela 3 – Fatores de emissão – bases internacionais.....	32
Tabela 4 - Fatores de emissão – base SIDAC*	33
Tabela 5 – Escopos do GHG Protocolo e exemplos de fontes de emissão de GEE.	42
Tabela 6 - Inventários de emissões de 2023 com base do GHG Protocol de construtoras.	43
Tabela 7 – Cenários da abordagem predominante x modelo proposto.....	58
Tabela 8 – Fontes de emissão de GEE em edificações de acordo com as fases do empreendimento e com o GHG Protocol	59
Tabela 9 - Etapas do ciclo de vida de acordo com a norma EN 15978 x Escopos do GHG Protocol.....	61
Tabela 10 - Fases do CV, classificação por escopos, faixas de participação e fatores influentes das emissões	65
Tabela 11 – Emissões de edificações por unidade funcional - levantamento bibliográfico.....	74
Tabela 12 - Vantagens e desvantagens dos modelos de mitigação de emissões de GEE.....	78

1. INTRODUÇÃO

1.1 - Contextualização

O setor da construção civil, em especial o subsetor de habitação, possui grande importância para a economia dos países, pois movimenta uma grande quantia de recursos financeiros relacionados às cadeias de materiais, bens e serviços, além de possibilitar renda para trabalhadores de variados níveis de formação. Conforme dados da Câmara Brasileira da Indústria da Construção Civil (CBIC, 2024), segundo o relatório “Desempenho da Construção Civil em 2024 e Perspectivas para 2025”, somente o setor de construção civil, subsetor de habitação, empregou diretamente, em outubro de 2024, 2,98 milhões de trabalhadores, ou seja, 6,25% da população que possui emprego formal. Segundo os dados do Novo Caged (Cadastro Geral de Empregados e Desempregados), em outubro de 2024 a população que possuía emprego formal correspondia a 47,63 milhões de trabalhadores (MTE, 2024).

Ao mesmo tempo em que estimula a economia positivamente, esse subsetor também é responsável pela geração de impactos ambientais, relacionados à extração de recursos naturais, alto consumo de energia e excessiva geração de resíduos, segundo Moreira, Cardoso e Arantes (2024). Dentre as diversas formas de poluição, a emissão de gases de efeito estufa acima de uma taxa considerada de equilíbrio climático natural absorvido pela natureza ganha destaque na presente pesquisa, pois contribui diretamente para o favorecimento do fenômeno conhecido como "aquecimento global" e, conseqüentemente, para as mudanças climáticas. O aquecimento global é tido como um dos gatilhos para favorecer anomalias em curso no planeta, denominadas “variabilidades climáticas”, que estão ocasionando a atual mudança climática (BARBIERI, 2013; MATTOS E GRANATO, 2010; PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS, 2014; ROTHSCILD, 2007; DIAS, 2002).

O termo “aquecimento global” refere-se ao aumento progressivo da temperatura média da atmosfera terrestre e dos oceanos, resultante da intensificação do efeito estufa. Por outro lado, as “mudanças climáticas” compreendem as alterações sistemáticas estatísticas em indicadores climáticos médio do clima que operam além dos limites naturais, manifestando-se por meio de anomalias térmicas, secas prolongadas, inundações severas, elevação do nível do mar e o retrocesso de geleiras. Tais fenômenos distinguem-se da variabilidade climática natural por apresentarem mudanças persistentes nos padrões estatísticos do clima em escala global (BARBIERI, 2013; MATTOS; GRANATO, 2010; P BMC, 2014; ROTHSCILD, 2007; DIAS, 2002).

Destacam-se, entre as emissões de gases do efeito estufa (GEE), aquelas de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), gases naturais e hexafluoreto de enxofre (SF₆). Estes são ainda acompanhados por duas famílias de gases artificiais, hidrofluorcarbonos (HFCs) e perfluorcarbonos (PFCs), presentes em diferentes processos de fabricação.

Com o intuito de promover processos de produção mais limpos e menos emissores de GEE, busca-se, atualmente, abrandar a situação de diversas maneiras: redução do uso de matérias primas poluentes, utilização de soluções construtivas ambientalmente adequadas no setor de construção, reutilização de materiais e, como medida de abrangência pública, cobranças de impostos atrelados a situações específicas locais (D'AMICO; POMPONI, 2023; KOZLOSKI; VAGHETTI; SILVA, 2019). Essa última solução possui o intuito de desestimular processos poluentes quando já existe tecnologia substituta e menos agressiva para alguns tipos de produção, além de se fazer presente, também, como forma de exigir medidas compensatórias aos danos ambientais, nos curto e médio prazos, para as situações em que se desconhece a existência de tecnologia substituta para essa transição (ZIOLO; BAK.; CHEBA, 2019).

O conceito de "créditos de carbono" foi apresentado publicamente em 1997, durante a COP-3, Terceira Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC, sigla em inglês). No evento, foi aprovado o denominado "Protocolo de Kyoto", em que foram firmados acordos que possibilitaram a criação do Comércio de Emissões (*Emission Trade*) entre países (MARIN, 2008).

Complementar ao "Protocolo de Kyoto" outro marco histórico que fortalece o comércio de emissões é o "Acordo de Paris", adotado em 2015 por 195 partes/signatários (194 Estados e a União Européia), em que se estabeleceram diretrizes de potenciais contribuições pretendidas pelos países para a redução das emissões de dióxido de carbono equivalente a partir de 2020, fortalecendo a resposta à ameaça das mudanças climáticas e aumentando a capacidade dos países para lidar com os impactos resultantes dessas mudanças. Entre os 29 artigos apresentados às nações, o artigo 6º é o que mais incentiva o comércio de emissões (ONU, 2015).

Em síntese, o Comércio de Emissões permite que países industrializados e poluidores possam comprar, de países em desenvolvimento, um produto denominado "crédito de carbono", atrelado a projetos ambientais de absorção ou neutralização de GEE, a fim de cumprir as agendas ambientais de limites de emissão acordadas.

O comércio de emissões é uma solução temporária que vem sendo estimulada nas últimas décadas, para permitir ao setor produtivo um desempenho com responsabilidade socioambiental mediante os passivos ambientais que produzem.

Nesse contexto, independentemente da nação, a mobilização do Estado é essencial para implementação de políticas e pactos internacionais, visto que o setor voluntário de comércio de créditos de carbono é muito pouco representativo, de menos de 1% desse segmento (AZEVEDO, 2024; ECOSYSTEM MARKETPLACE, 2022), quando comparado com a expectativa de comercialização em relação ao mercado regulado. Por conta disso, é essencial criar um mercado regulado, que envolva formalmente governos, empresas e setores da economia.

O presente trabalho aborda o setor de construção de edificações no Brasil e suas implicações na emissão de GEE, com a abordagem de redução de seus impactos via identificação de responsabilidades e discussão de mecanismos de compensação. Considera-se que boa parte dos principais agentes do setor, principalmente os(as) empresários(as) do ramo, acompanhados de engenheiros(as) com formação estritamente técnica, não se caracteriza por possuir cultura com ideais de preservação do planeta.

1.2 - Justificativas

A realização do presente estudo justifica-se diante do quadro mundial de emissões de gases do efeito estufa na atmosfera, principais causadores das mudanças climáticas em curso no planeta, e da falta de cultura de busca de mitigação dessas emissões no setor de construção civil brasileiro. O tema ainda é debatido de forma pouco abrangente e pouco amadurecida no Brasil, em termos de leis, normas específicas e trabalhos acadêmicos. Portanto, tornam-se prementes estudos no sentido tanto de reduzir as emissões com novas tecnologias limpas, como de desenvolver mecanismos de mitigação e/ou compensação das emissões ocorridas.

1.3 - Objetivos geral e específicos

1.3.1 - Objetivo geral

O objetivo principal do presente trabalho é analisar, sob uma perspectiva contemporânea, os impactos ambientais associados às edificações no cenário brasileiro, com ênfase nas emissões de gases de efeito estufa (GEE), a partir de uma abordagem baseada no ciclo de vida, buscando identificar mecanismos de mitigação e responsabilização aplicáveis ao setor da construção, considerando o papel dos construtores e empreendedores

1.3.2 - Objetivos específicos

Como objetivos específicos, pretende-se:

- Comparar e articular duas abordagens de análise das emissões associadas às edificações, a partir da Análise de Ciclo de Vida (ACV) e da classificação por escopos do GHG Protocol;
- Sistematizar resultados quantitativos de emissões de CO₂ por metro quadrado de edificações, considerando características do mercado brasileiro e informações da literatura;
- Analisar a capacidade de influência do construtor/empreendedor sobre as emissões de GEE ao longo do ciclo de vida das edificações;
- Propor um modelo conceitual de responsabilização das emissões de GEE no setor da construção, baseado em indicadores de emissões por unidade funcional (m²) e na adoção de soluções mitigadoras associadas às decisões de projeto e construção.

1.4 - Estrutura do trabalho

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos.

O Capítulo 1 busca fazer uma contextualização do tema, apresenta a Introdução, a Justificativa e Objetivos do estudo.

O Capítulo 2 contém a fundamentação teórica do trabalho. Este capítulo está estruturado de forma a abordar os conceitos de mudanças climáticas, pegada de carbono e informar sobre as limitações e desafios dos inventários de emissões em edificações.

No Capítulo 3 são apresentadas duas abordagens de inventários de emissões de GEE em edificações, via análise do ciclo de vida e por meio do GHG Protocol. Nas subseções foram detalhados: GHG Protocol no mercado brasileiro de construção civil e Emissões das edificações e o fator tempo.

Modelos de mitigação de impactos ambientais possíveis de serem adotados no mercado brasileiro de construção civil são apresentados no Capítulo 4.

A Metodologia utilizada na pesquisa é apresentada no Capítulo 5.

Os resultados obtidos em cada uma das etapas metodológicas são trazidos no Capítulo 6, bem como a análise dos resultados.

Ao final, seguem as Considerações Finais e referências bibliográficas.

1.5 - Questões orientadoras de pesquisa

Para o desenvolvimento do tema da presente dissertação colocam-se as seguintes questões orientadoras:

- Qual o peso da construção civil e do subsetor edificações no consumo de energia/emissões de CO₂, nos panoramas mundial e brasileiro?
- Qual(is) fase(s) de um empreendimento do subsetor edificações emite mais gases do efeito estufa?
- Qual(is) a(s) fase(s) do empreendimento ou do ciclo de vida da edificação que mais tocam ao empreendedor no sentido da responsabilização pelas emissões de GEE?
- Há um índice médio ou aceitável de emissões de CO₂ por metro quadrado de construção? Quais fatores influenciam a variação desse índice?
- Quais critérios podem ser usados para estabelecer uma meta de redução de emissões de CO₂ da construção de edifícios?
- O mercado de "créditos de carbono" tem qual(is) relação(ões) com o ramo de construção de edifícios? Que outros mecanismos podem contribuir ou serem desenvolvidos?

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 - Buscas bibliográficas e breve apanhado sobre o tema

Neste capítulo é apresentado um referencial teórico sobre o tema proposto, baseado na literatura sobre as emissões de GEE relacionadas às edificações.

O mapeamento foi realizado via Portal de periódicos da CAPES (CAPES, 2024), por meio de acesso remoto ao conteúdo disponibilizado para a Universidade Federal de Juiz de Fora, adotando-se como fontes de dados as plataformas *Web of Science* e *Scopus*. Foram realizadas buscas com a reunião dos seguintes termos: *Construction carbon credit market*; *Carbon management in construction*; *Carbon tax for building construction*; *Sustainable construction carbon credits*; *Emissions Offsetting in Buildings*; *GHG Protocol Program*; *CO₂ Emissions from Residential Buildings* e *CO₂ Embodied Energy in Buildings*.

Nas buscas efetuadas, todas as palavras-chave testadas resultaram em, no máximo, 1557 publicações, incluindo artigos completos, resumos e capítulos de livros. Aplicando-se filtros de publicações abertas, idioma em inglês, área de engenharia civil e *greenhouse gases*, encontrou-se o que está resumido na Tabela 1, que apresenta o número de publicações com títulos relacionados ao assunto proposto.

Tabela 1 - Número de publicações encontradas em busca por termos.

Termos	Publicações relacionados à temática CO ₂ em edificações	
	Número de publicações	
	<i>Web of Science</i>	<i>Scopus</i>
<i>Construction carbon credit market</i>	3	2
<i>Carbon management in construction</i>	14	7
<i>Carbon tax for building construction</i>	7	4
<i>Sustainable construction carbon credits</i>	3	3
<i>Emissions Offsetting in Buildings</i>	11	15
<i>GHG Protocol Program</i>	35	19
<i>CO₂ Emissions from Residential Buildings</i>	39	31
<i>CO₂ Embodied Energy in Buildings</i>	37	16
<i>Carbon Market Brazilian Legislation</i>	3	5

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Destaca-se que, como a temática é relativamente nova, existem poucos estudos na área se comparados a linhas de pesquisa mais tradicionais. Por conta disso, não se estabeleceu um

intervalo de datas para a seleção das publicações. Assim, a partir dos resultados encontrados foram selecionadas, para leitura, publicações com títulos considerados relevantes ao tema da dissertação. Após a seleção por títulos, foi realizada a leitura do resumo das publicações, excluindo-se aquelas que não apresentam informações aderentes à temática da pesquisa. As publicações que se revelaram, finalmente, as mais importantes, foram selecionadas para leitura completa. Um extrato dos pontos principais de cada publicação é apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 - Fontes bibliográficas relevantes para a pesquisa (da mais recente até a menos recente).

Referência	Título	Objetivos	País
Silva, F. B. e John, V. M (2024)	Actual sources of life cycle impacts: Elementary processes and flows causing environmental impacts for a typical Brazilian building	Identificar caminhos que possibilitam explorar os reais impactos ambientais que uma construção típica brasileira provoca, com base na metodologia de avaliação do ciclo de vida (ACV).	Brasil (BR)
Hoxha; Birgisdottir e Röck (2024)	Climate IMPACT of EU building materials: Data compilation and statistical analysis of global warming potential in environmental product declarations	Propõe a necessidade de substituição de materiais para diminuir os impactos de emissões com base nas Declarações Ambientais de Produto (EPDs) da União Europeia, em diferentes bancos de dados.	União Europeia (UE)
Röck, Martin; Balouktsi, Maria; Saade (2023)	Embodied carbon emissions of buildings and how to tame them	Aborda as emissões de carbono incorporado com base na ACV de edificações, em três ciclos: extração, construção e uso. Apresenta os conceitos de emissões líquidas zero, bem como estratégias de redução e remoção do carbono.	União Europeia (UE)
D’Amico, B. et al. (2023)	Net zero in buildings and construction: Use and misuse of carbon offsets	Apresenta os impactos de emissões de GEE relacionados a edificações, destacando o conceito de emissões operacionais e incorporadas. Além disso, apresenta possibilidades de mecanismos de compensação do carbono.	Reino Unido (UK)
Silva et al. (2023)	Carbon Emissions Inventory in Building Projects: A Case Study in Bahia	Apresenta um estudo completo de inventário de emissões baseado na metodologia do GHG Protocol de uma edificação residencial multifamiliar, explorando a representatividade das porcentagens dos escopos até a fase de conclusão da obra.	Brasil (BR)
Kabundu, E. et al. (2022)	The 2019 carbon tax in South Africa: Effects on relative cost of building materials, welfare, emissions, and energy consumption for households	Analisa o potencial impacto de um imposto de carbono em relação a edificações, considerando os custos desta medida em relação aos materiais e o repasse desses custos as famílias/consumidores do produto residencial.	África do Sul (ZA)
Röck et al. (2020)	Embodied GHG emissions of buildings - The hidden challenge for effective climate change mitigation	Sustenta que emissões incorporadas dos materiais ganham destaque nas edificações ao longo do seu ciclo de vida, visto que emissões de uso e ocupação passam a ter pouca representatividade a partir do momento que passam a existir aparelhos de alta eficiência e produção de energia nas edificações.	União Europeia (UE)

Quadro 1 - Fontes bibliográficas relevantes para a pesquisa (da mais recente até a menos recente) – Cont.

Referência	Título	Objetivos	País
Schmidt, M et al. (2020)	Integrating life cycle GHG emissions into a building's economic evaluation	Argumenta que as emissões incorporadas dos materiais possuem destaque a partir do momento em que é solucionada a questão das emissões operacionais. É realizada uma simulação de estudo econômico para entender os custos de se tributar proprietários de edificações anualmente.	Austrália (AU)
Ziolo, M., Bak, I., Cheba, K. (2019)	Environmental taxes - how public policy makers can use them in the decision-making process?	Analisa as políticas públicas relacionados à criação de impostos ambientais, em especial tributação relacionada às emissões de GEE e sua real eficácia atual nos países da União Europeia. É discutido se as mesmas práticas abordadas em países desenvolvidos também podem ser aplicadas em países em desenvolvimento.	Reino Unido (UK)
Saade, M. R. M. et al. (2014)	Material eco-efficiency indicators for Brazilian buildings	Apresenta possibilidades de fatores de emissão de GEE para o contexto brasileiro de materiais mais utilizados na indústria brasileira de construção civil. Além disso, apresenta possibilidades de diferentes métodos construtivos que podem ser utilizados por construtoras para minimizar as emissões.	Brasil (BR)
Onat; Küçükvar; Tatari (2014)	Scope-based carbon footprint analysis of U.S. residential and commercial buildings: An input output hybrid life cycle assessment approach	Analisa o ciclo de vida de edificações, destacando o uso da energia incorporada e operacional e sua representatividade em toda a cadeia de produção. São avaliados os diferentes tipos de emissão conforme a classe de edificação (residencial e comercial). Além disso, explora o tema em relação ao período de construção e suas emissões durante o tempo de vida das edificações.	Estados Unidos da América (EUA)

Fonte: Autor (2026).

Com vistas à mitigação/compensação das emissões de CO_{2e} no setor da construção civil, diversos países vêm adotando alternativas a fim de cobrir a demanda por políticas públicas adequadas. Essas soluções, por vezes em forma de impostos ambientais, não são alternativas definitivas e consolidadas, mas atendem a acordo globais, sendo necessário o seu monitoramento de modo a avaliar como serão seus reflexos na sociedade e na economia (ZIOLO; BAK.; CHEBA, 2019).

Segundo Kabundu (2019), o sucesso em conceber um imposto e, conseqüentemente, a sua eficácia, está relacionado a existir rigor na política de implementação, que deverá prever como serão o seu comportamento e sua cobrança ao longo do tempo.

Schmidt; Crawford e Myers (2020) destacam que a aceitação de impostos deve vir acompanhada de incentivos de redução, importantes na estratégia de absorção pela sociedade, possibilitando maior aceitação de tecnologias “verdes” em habitações.

A construção de modelos de neutralização ou compensação ambiental também vão no mesmo sentido, o da contribuição para atendimento de metas locais e internacionais (D’AMICO; POMPONI, 2023).

D’Amico e Pomponi (2023) afirmam que o setor de construção civil é de difícil descarbonização, o que leva à necessidade de projetos paralelos destinados à captura e armazenamento de carbono, absorção e sequestro (por exemplo, plantação de árvores ou preservação de florestas) e de desenvolvimento de geração de energia renovável (eólica, solar, magnética, entre outras).

Os índices de emissões de carbono incorporado dos materiais são a melhor base para contabilização das emissões de GEE dos edifícios. Porém, podem apresentar distorções entre os países devido a diferenças de metodologia de cálculo, de matriz energética, de processos produtivos ou à falta de participação dos agentes envolvidos na construção da informação, o que sugere cautela nos trabalhos dos especialistas em análises de ciclo de vida de produtos (HOXHA; BIRGISDOTTIR E RÖCK, 2024).

A falta de participação dos agentes emissores é reforçada por Silva e John (2024). Os autores destacam que os custos primários de construção dos índices são elevados para as empresas e muitas optam por não fazer, ou realizam inventários de forma incompleta, não abrangendo toda a cadeia do ciclo de vida da construção.

Um segundo desafio indicado por Röck et al. (2020) é visualizar as emissões durante o ciclo de vida de uma construção. O uso da energia operacional, segundo os autores, no caso de países na União Europeia, pode representar de 75% a 80% das emissões totais de todas as fases do empreendimento.

A fase de uso das edificações residenciais foi destacada por Röck; Balouktsi; Saade (2023) como sendo aquela de maior participação em emissões de GEE, que podem, no entanto, ser facilmente reduzidas com a adoção de alternativas construtivas (equipamentos e instalações) que privilegiem fontes renováveis.

Outra possibilidade de compensação ou mitigação de impactos das emissões das emissões é o comércio de carbono, representado pelo “mercado de carbono”. Segundo Vargas; Delazeri; Ferreira (2021), é uma forma de auxiliar os países desenvolvidos e os de economia em transição para a cumprirem suas metas de redução ou limitação de emissões.

Como forma de contribuir para programas de sustentabilidade em edificações nos municípios, reduzindo as emissões de forma indireta, no contexto da cidade de Juiz de Fora existe a Lei nº 14.015 de 2020 (Dispõe sobre o Programa de Certificação Sustentável em Edificações no Município de Juiz de Fora, denominado JF IPTU VERDE e dá outras providências). Essa lei possibilita que os proprietários de habitações, ao desejarem fazer uso desse “programa de desconto”, também possam contribuir para a reduções de emissões em sua propriedade de forma indireta.

De modo geral, para complementar as consultas às referências reunidas no Quadro 1 e enriquecer o raciocínio para o desenvolvimento do tema estudado, foram também realizadas leituras de livros, teses etc., expostos de forma completa nas referências bibliográficas do trabalho e citados no corpo do texto da presente pesquisa.

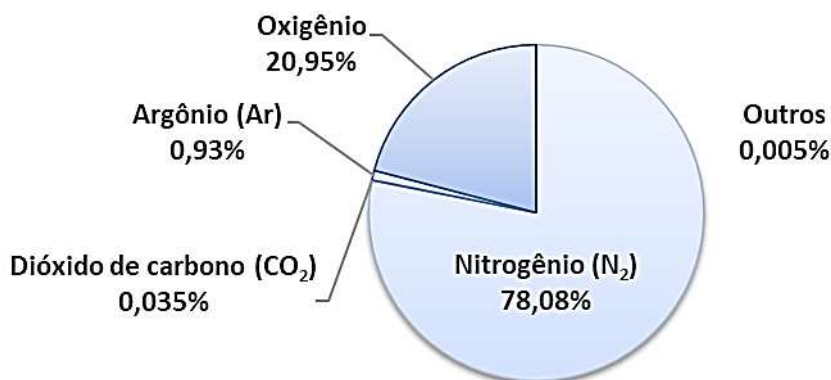
2.2 - Mudanças climáticas e o setor de construção civil

2.2.1 - Potenciais causas das mudanças climáticas

A atmosfera, segundo Ayoade (1996), pode ser definida como uma camada fina de gases fixados à Terra pela força da gravidade, dividida em cinco camadas: troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera e exosfera. A maior parte (75%) da massa gasosa fica concentrada na troposfera, cuja extensão é de aproximadamente 12 km, ou seja, apenas 0,18% do raio da Terra, de aproximadamente 6.371 km. Conforme a Figura 1 (LUTGENS; TARBUCK; HERMAN, 2018), a atmosfera é compreendida como uma

mistura mecânica estável de gases, representados por nitrogênio, oxigênio, argônio, dióxido de carbono, ozônio e o vapor d'água, assim como outros em proporções muito pequenas, como neônio, criptônio, metano, hélio e hidrogênio,

Figura 1 - Composição do ar seco.



Fonte: Autor (2024), baseado em Lutgens; Tarbuck; Herman (2018).

Devido às atividades antrópicas, a alteração das características naturais da atmosfera compromete a saúde dos seres vivos e promove a degradação de materiais e ecossistemas (COSTA, 2021). Conforme aponta Costa (2021), a degradação ambiental transcende as estruturas da superfície terrestre, atingindo a própria composição atmosférica. Nesse contexto, a elevada concentração de Gases de Efeito Estufa (GEE) altera o balanço energético do planeta, intensificando a retenção de calor e, consequentemente, impulsionando as mudanças climáticas.

O consenso científico estabelece uma correlação direta entre o aumento das temperaturas globais no período contemporâneo e as atividades antropogênicas. Tais atividades atuam como uma força que intensifica as mudanças climáticas, resultando no aumento da frequência e severidade de eventos extremos, como secas e precipitações intensas. Além disso, observam-se impactos críticos na biodiversidade terrestre e aquática, a elevação progressiva do nível médio do mar e o consequente deslocamento forçado de populações costeiras (BARBIERI, 2013; DA SILVEIRA; PEYERL, 2025).

Sabe-se que a Terra passa por períodos de resfriamento e aquecimento de longo prazo, fenômeno natural existente em nosso planeta, como mencionado por Ayoade (1996), Marin (2008) e Maruyama (2009). Esses são percebidos por meio de indicadores biológicos (fósseis) ou inorgânicos (minerais, sedimentos, paisagens trabalhadas no gelo), bem como por métodos físico-químicos (razão isotópica em sedimentos ou em esqueletos de fósseis) e análise de anéis de crescimento de árvores, conforme destaca o Painel

Brasileiro de Mudanças Climáticas (2014). Porém, a teoria do aquecimento global reforça que esses fenômenos são intensificados no curto prazo pelas atividades humanas devido à emissão de GEE (IPCC, 2013).

As grandes concentrações de poluentes na atmosfera, conjugadas com a presença de gases naturais em proporções elevadas, acima de uma taxa de equilíbrio natural, fazem com que a temperatura da Terra aumente (Costa, 2021; e IPCC, 2013). Sendo assim, faz-se necessário reduzir as emissões de gases naturais, como o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4), e o óxido nitroso (N_2O), assim como aqueles artificiais produzidos pelo ser humano em processos industriais, como o hexafluoreto de enxofre (SF_6), acompanhados pelos hidrofluorcarbonos (HFCs) e os perfluorcarbonos (PFCs) (Barbieri, 2013 e IPCC, 2013). Esta constatação é possível observando-se dados históricos relativamente recentes, a partir de 1950, divulgados pelo IPCC - *The Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2013). Esses gases, em maiores concentrações na atmosfera, aumentam a absorção do infravermelho terrestre, causando o fenômeno do “efeito estufa não natural”, que induz a variações atípicas do clima em diversas partes da superfície terrestre que, passam a ocorrer em uma pequena escala de tempo (BARBIERI, 2013).

Pode-se afirmar que o “efeito estufa não natural” é o resultado do balanço estimado das emissões de gases de efeito estufa (GEE) provenientes das atividades humanas, visto que se utiliza uma modelagem matemática baseada em fatores de emissão e médias estatísticas sujeitas a incertezas (ABNT NBR ISO 14064-1, 2022). Essa parcela antrópica pode ser quantificada por meio de inventários de emissões que abrangem tanto as fontes diretas, vinculadas às operações, quanto as indiretas, associadas à cadeia de valor e aos consumidores (ABNT NBR ISO 14064-1, 2022; FGV, 2025).

O IPCC destaca, em seu relatório “*CLIMATE CHANGE 2023 - Synthesis Report Summary for Policymakers*” (IPCC, 2023): “As atividades humanas, principalmente por meio de emissões de gases de efeito estufa, causaram inequivocamente o aquecimento global, com a temperatura da superfície global atingindo 1,1 ° C acima de 1850-1900 em 2011-2020. As emissões globais de gases de efeito estufa continuaram a aumentar, com contribuições históricas e contínuas desiguais decorrentes do uso insustentável de energia, uso da terra e mudança no uso da terra, estilos de vida e padrões de consumo e produção entre regiões, entre e dentro dos países e entre indivíduos”.

O objetivo do IPCC é fornecer aos formuladores de políticas, públicas ou não, avaliações científicas regulares selecionadas sobre a mudança do clima, suas implicações e possíveis riscos futuros, bem como propor ações aos países de adaptação e mitigação de efeitos (WMO, 2026).

Neste contexto, é esperado que a adoção de medidas mitigadoras de emissão de gases naturais e artificiais resultantes de atividades antrópicas resultem em emissões cada vez menores, de forma a permitir um estado de equilíbrio natural absorvível pelo ecossistema da Terra, contribuindo para a diminuição das flutuações climáticas.

Conceitualmente, pela teoria clássica, espera-se que a minimização de emissão de gases possibilite atenuar uma mudança brusca no tipo de clima de uma região, além do convencional esperado, visto que são comuns mudanças climáticas durante períodos de séculos ou milênios (AYOADE, 1996). Entretanto, para alguns autores como Pörtner, et al. (2022), baseados em modelos matemáticos, as projeções realizadas e apresentadas à comunidade científica já indicam a irreversibilidade das mudanças climáticas antrópicas já induzidas.

Refletindo sobre o papel da Engenharia, entende-se que a missão é buscar soluções de adaptação da melhor forma possível aos eventos climáticos que já ocorreram ou estão em curso e estimar os que ainda vão acontecer para minimizá-los.

2.2.2 - Dióxido de carbono equivalente

O dióxido de carbono (CO_2) exerce papel central na regulação do clima terrestre, em função de sua capacidade de absorção de radiação infravermelha e de sua participação no efeito estufa. Atividades antrópicas, como a mudança do uso do solo, a remoção da cobertura vegetal e a queima de combustíveis e biomassa, alteram o ciclo natural do carbono e contribuem para o aumento das emissões de CO_2 , comprometendo os fluxos naturais de absorção e armazenamento do carbono (ABREU et al., 2024).

Embora outros gases de efeito estufa, como o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O) e o ozônio (O_3), também desempenhem papel relevante no sistema climático, o CO_2 destaca-se como o principal gás de origem antrópica associado às mudanças climáticas, em razão de seu volume de emissões e de sua persistência na atmosfera (IPCC, 2013).

Para comparar as contribuições de diferentes gases no aquecimento do planeta, utiliza-se um parâmetro denominado Potencial de Aquecimento Global (GWP, sigla em inglês), proposto pelo IPCC, que tem como objetivo expressar o impacto relativo de cada

gás do efeito estufa em relação a um gás padrão. O gás escolhido para referência foi o dióxido de carbono (ABNT NBR ISO 14064-1, 2022; FORSTER, P. et al., 2021).

A Tabela 2 apresenta, de forma simplificada, os principais gases estimuladores do efeito estufa e sua proporção em CO_{2e}. Assim, no modelo GWP, um quilograma de metano (CH₄), com seu GWP de 28, equivale a 28 quilogramas de “dióxido de carbono equivalente” (CO_{2e}).

Tabela 2 - Principais GEE e sua conversão em CO_{2e}.

Gases do efeito estufa	Quantidade do gás (kg)	Conversão em CO₂ equivalente (CO_{2e}) - GWP100
Dióxido de Carbono (CO ₂)	1	1
Metano (CH ₄)	1	28
Óxido Nitroso (N ₂ O)	1	265
Hexafluoreto de enxofre (SF ₆)	1	23.500

Fonte: Adaptado de IPCC pelo autor (2024).

2.2.3 - Participação do setor da construção civil nas emissões de GEE

No Brasil, a responsabilidade por coletar dados estimados anuais de emissões do CO_{2e} é do Governo Federal, conforme previsto no Decreto nº 9.578/2018, a fim de cumprir os acordos internacionais. A elaboração dessas estimativas, bem como o aprimoramento da metodologia de cálculo da projeção de emissões, é de responsabilidade do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) (MCTI, 2022).

É responsabilidade do MCTI divulgar anualmente os resultados das estimativas por meio do Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE), instituído como o instrumento oficial do governo para mensuração, relato e verificação das emissões de GEE (MCTI, 2022).

Em acesso à plataforma SIRENE (MCTI, 2024), percebe-se que a coleta de dados atualmente se restringe aos setores de: Energia, Processos Industriais, Agropecuária, Mudança de Uso da Terra e Resíduos, o que dificulta a compreensão isolada de como é o comportamento das emissões do setor de construção civil. Todavia, sabe-se que, indiretamente, o setor de construção está participando de forma transversal dos setores de energia, processos industriais, mudança de uso da terra e resíduos. Assim, segundo as diretrizes metodológicas do IPCC (2006), adotadas pelo MCTI (2022), o setor de

construção civil ao consumir insumos da indústria de base (Processos Industriais), utilizar energia e combustíveis para maquinários e frotas de veículos (Energia), comprar terras para implantação de empreendimentos realizando a supressão de vegetação (Mudança de Uso da Terra) e, por fim, descartar materiais em aterros sanitários (Resíduos), participa das emissões de GEE.

Outra forma de visualizar a participação do setor nas emissões, avaliando um panorama de emissões de modo global, é associando-o à matriz energética brasileira, que no ano de 2024 foi de 74,8 MtCO_{2e} para a indústria e 18,6 MtCO_{2e} para as residências (EPE, 2025).

Em relação ao consumo de energia, o uso das edificações brasileiras foi responsável por, em média, 10,8% da demanda nacional de energia (EPE, 2025).

Segundo o relatório *2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector* (PNUMA, 2022), publicado pelo Programa para o Meio Ambiente da ONU (PNUMA) em março de 2024, o setor da construção civil foi responsável por 37% das emissões de CO₂ do planeta, sendo o setor residencial apontado como o responsável por cerca de 6% das emissões globais de gases de efeito estufa de modo direto e 11% de forma indireta. Em relação ao consumo de energia, segundo o mesmo relatório: as edificações foram responsáveis por, em média, 34% da demanda global de energia, 21% destinados ao uso residencial.

2.3 - Pegada de carbono em edificações

2.3.1 - Conceito de pegada de carbono

Termos e expressões diversas relacionadas ao carbono envolvido nos processos produtivos e nos bens produzidos permeiam os diferentes setores de atividades humanas, da agropecuária à construção civil, passando pelo consumo de energia, transportes e descarte de resíduos. Procura-se entender e mensurar as quantidades de carbono envolvidas em cada setor, com vistas ao controle, identificação de etapas críticas e melhoria dos processos para mitigação, compensação ou neutralização das emissões.

A pegada de carbono pode ser entendida como um subconjunto da “pegada ecológica” proposta por Wackernagel e Rees (1996), que se refere à área de terra e mar biologicamente produtiva necessária para sustentar uma determinada população humana, expressa em hectares globais. A pegada de carbono refere-se à área de terra necessária

para assimilar todo o dióxido de carbono (CO₂) produzido pela humanidade ao longo de sua vida (PANDEY; AGRAWAL; PANDEY, 2011). Porém, aos olhos da ciência, antes de assimilar é preciso calcular o carbono emitido. Entram nesse cálculo, além do CO₂, outros gases que causam o efeito estufa, como o metano (CH₄), o óxido nitroso (N₂O), os hidrofluorcarbonos (HFCs) e os perfluorcarbonos (PFCs), convertidos em “CO₂ equivalente” (CO_{2eq} ou CO_{2e}) de acordo com seus respectivos valores de Potencial de Aquecimento Global (GWP, em inglês (IPCC, 2006).

A pegada de carbono é, também, entendida como uma metodologia de cálculo do volume de carbono emitido nas atividades dos indivíduos, empresas (produtos) e governos. A norma ABNT NBR ISO 14067:2023 – “*Gases de efeito estufa - Pegada de carbono de produtos - Requisitos e orientações sobre quantificação*” define **pegada de carbono de produto** (PCP ou CFP, da sigla em inglês) como a soma das emissões e remoções de GEE associadas às fases do ciclo de vida de um produto, expressas em CO_{2e}. A norma aplica-se a qualquer tipo de produto, bem ou serviço, incluindo materiais de construção, alimentos, equipamentos, energia etc. (ABNT, 2023).

O edifício pode ser enxergado, nesse contexto, como um produto. Em determinado ponto escolhido como o início de sua existência (projeto, canteiro de obras, entrega aos clientes), há impactos ambientais que ocorrem antes e depois desse marco. Antes, aqueles ligados aos materiais empregados na obra - extração de matéria prima e fabricação, por exemplo; depois, aqueles relacionados ao seu uso e manutenção, bem como os que ocorrem em fases posteriores, de fim de vida – demolição, por exemplo.

2.3.2 - Fatores de emissão e fontes de dados para construção civil

Fator de emissão (FE), segundo a ABNT NBR ISO 14067:2023 (ABNT, 2023), é um coeficiente que relaciona dados de atividade com a emissão de GEE. É preciso rastrear um processo, identificando as etapas e as fontes de emissão, medindo a quantidade emitida e relacioná-la a uma unidade funcional. Ou seja, uma quantidade de GEE é atribuída a uma quantidade de produto ou serviço usada como referência. Exemplo: massa de CO₂ por massa de produto (kgCO₂/kg).

Em termos gerais:

$$FE = \frac{\text{Emissões totais de GEE (kgCO}_2\text{e)}}{\text{Quantidade de produto (kg, t, m}^2\text{, m}^2 \text{ etc.)}}$$

No caso dos **materiais de construção**, o fator de emissão reflete o **conteúdo de carbono embutido** (ou incorporado) desde a extração da matéria-prima (“berço”) até a entrega do material no portão da fábrica, trecho entre duas fronteiras conhecido como “berço ao portão”(“cradle-to-gate”, em inglês). Para cada etapa, levantam-se os **fluxos de entrada e saída**:

Entradas: consumo de energia (eletricidade, diesel, gás, coque, biomassa), matérias-primas, água, reagentes.

Saídas: produtos, coprodutos, resíduos, emissões atmosféricas, efluentes.

Todos os gases de efeito estufa emitidos (CO₂, CH₄, N₂O, HFCs etc.) são convertidos em CO₂ equivalente usando-se os potenciais de aquecimento global (GWP) do IPCC AR6 (IPCC, 2023) (horizonte de 100 anos). Finalmente, somam-se as emissões de todas as fontes dentro da fronteira definida do processo e divide-se pela quantidade de produto obtido. Podem ser usados, para o inventário de emissões, dados primários (medição direta no processo ou calculada diretamente), dados obtidos no local ou dados secundários (uso de bancos de dados, fatores de emissão, literatura, estimativa etc.) (ABNT, 2023).

Diante da falta oficial, no Brasil, de informações de setores da indústria e materiais, empresas e organizações privadas criam bancos próprios e modelos de correlação com bases reconhecidas internacionais. São exemplos de plataformas de reconhecimento internacional que disponibilizam dados de índices de emissões: base de dados suíça Ecoinvent (2024), uma das mais consultadas no mundo, e a britânica ICE (2024) (*The Inventory of Carbon and Energy*), da Universidade de Bath.

Existem, no Brasil, algumas compilações de dados que reúnem fatores de emissão para os materiais de construção, como cimento, aço, cerâmica, vidro, alumínio, madeira etc., de publicações acadêmicas a iniciativas setoriais (COSTA. B. L. C., 2012; GONÇALVES; BODE, 2015; IPT, 2026). A principal ressalva para o uso dessas fontes de dados é sempre verificar se são condizentes com as realidades locais, já que as emissões de cada processo dependem de condições particulares de tecnologia e tipo de energia usada, modais de transporte, matérias primas e etapas de produção específicas, que podem variar de um país ou região a outra.

O Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção - Sidac, iniciativa pública com a participação da indústria da construção civil, sob coordenação

do Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2025b), permite calcular indicadores de desempenho ambiental de produtos de construção com base em dados brasileiros e nos conceitos da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

A Tabela 3 apresenta uma compilação resumida de base de dados internacionais de fatores de emissão.

Tabela 3 – Fatores de emissão – bases internacionais

Material / Processo	Fator de emissão	Unidade	Fronteira / Observações	Fonte
Aço (alto-forno)	1,46	tCO ₂ /t aço	Produção integrada (minério + carvão)	IPCC EFDB*
Aço (forno elétrico)	0,08	tCO ₂ /t aço	Rotas com sucata e energia elétrica	IPCC EFDB
Agregados naturais	0,005	kgCO ₂ /kg	Brita e areia; baixa intensidade	ICE Database
Alumínio primário	14,8 – 15,1	tCO ₂ /t alumínio	Média global	IPCC EFDB
Cal virgem (CaO)	0,785	tCO ₂ /t cal	Emissão de processo de calcinação	IPCC EFDB
Cerâmica vermelha (tijolo/bloco)	0,43 – 0,55	tCO ₂ /t produto	Depende do combustível (lenha vs GN) e tipo de forno	IPCC EFDB
Cimento (clínquer)	0,5071	tCO ₂ /t clínquer	Emissões de processo (calcinação de CaCO ₃)	IPCC EFDB
Cimento (produto)	0,49	tCO ₂ /t cimento	Inclui emissões de processo + parte energética	IPCC EFDB
Concreto estrutural (global)	0,10 – 0,16	kgCO ₂ /kg	Média internacional, 25–40 MPa	ICE Database**
Tijolo comum	0,24	kgCO ₂ /kg	Média “cradle-to-gate”	ICE Database
Vidro	0,20	tCO ₂ /t vidro		IPCC EFDB

*https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/efdb/find_ef.php?ipcc_code=2.A.1

**<https://circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html>

Fonte: Autor (2026)

A Tabela 4 apresenta uma compilação resumida de estudos como os de Costa, B. L. C. (2012) e Gonçalves e Bode (2015) e bases de dados nacionais de alguns fatores de emissão que podem ser aplicados no setor de construção civil para inventários de emissão.

Tabela 4 - Fatores de emissão – base SIDAC*

Material / Processo	Fator de Emissão** (kgCO₂e/kg)	Observações
Aço CA-50 (vergalhão)	0,850 – 0,950	Média nacional
Alumínio secundário (reciclado)	0,400 – 0,600	Reprocessamento e fusão; não inclui coleta
Areia processada (natural ou de britagem)	0,002 – 0,004	Inclui extração, peneiramento e transporte interno
Argila calcinada	0,050 – 0,080	Emissões de queima e energia térmica; depende da umidade
Bloco cerâmico	0,150 – 0,220	Queima com lenha ou gás natural; inclui secagem
Brita (pedra britada)	0,004 – 0,006	Emissões associadas à britagem e energia elétrica
Cimento Portland (CP II-E)	0,480 – 0,560	Média nacional, inclui clínquer, moagem e energia elétrica
Concreto usinado (fck = 25 MPa)	0,200 – 0,380	Depende do teor de clínquer e traço; transporte opcional
Gesso (em pó)	0,090 – 0,110	Calcinado a 150–180 °C; inclui transporte até fábrica
Telha cerâmica	0,130 – 0,210	Similar aos blocos; emissões menores pela menor massa
Vidro plano (<i>float glass</i>)	0,180 – 0,220	Mistura soda-lime; inclui fundição e energia térmica

* SIDAC - Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (<https://sidac.org.br/>)

**Todas as fronteiras: A1-A3 (berço ao portão da fábrica)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Os fatores de emissão de materiais são usados como dados de entrada no cálculo da quantidade de CO₂ por unidade funcional. Orientando-se pela metodologia de elaboração de orçamentos de obra, o ponto de partida é a montagem das composições de custo, obtidas por meio de medições de gastos de materiais por unidade de serviço como, por exemplo, m² de alvenaria, m² de telhado, m³ de concreto etc. Com entradas de fatores de CO₂ ao invés de valores em reais (R\$), é possível chegar ao “custo” de CO₂ de um serviço. A soma do custo de todos os serviços de uma obra é o seu custo total. Dividindo-se este total pela área construída chega-se, finalmente, à quantidade de CO₂ por m² de construção, isto é, a unidade funcional geralmente adotada para comparações entre edificações diferentes.

2.4 - Limitações e desafios na elaboração de inventários de carbono de edificações

A elaboração de inventários de carbono de edificações, especialmente quando estruturados como ACV, depende de decisões metodológicas que influenciam diretamente a confiabilidade e a comparabilidade dos resultados.

Um dos maiores desafios é escolher corretamente as fronteiras do sistema, porque a ACV depende dessa delimitação. A avaliação ambiental de edifícios, em particular, trabalha com cenários que podem não refletir integralmente o desempenho real futuro (MEQUIGNON, 2011). Em outras palavras, diferenças entre estudos podem surgir simplesmente porque um inclui certas fases (p.ex., substituições e manutenção) e outro não inclui.

Para materiais e produtos, o uso de dados de Declarações Ambientais de Produto (EPDs, da sigla em inglês) depende de bases de dados robustas, organizadas por órgãos representativos do setor e baseadas na série de normas ISO 14040, conforme a norma ISO 14025:2006 (ISO, 2006). Sem a disponibilidade de EPDs bem estruturadas e confiáveis, o inventário tende a recorrer a dados genéricos/médios, o que agrega incertezas. Neste ponto, o Brasil ainda segue carente desse tipo de base de dados, exceto por iniciativas em estágio incipiente de desenvolvimento e de trabalhos acadêmicos que adaptam bases estrangeiras para o nosso cenário. Um exemplo inspirador de dados internacionais é a base francesa INIES (2024) - *Les données environnementales et sanitaires de référence pour le bâtiment*, que possui, em acesso aberto, mais de 10 mil FDES (fichas de declaração ambiental e sanitária) de produtos para construção de edifícios.

A etapa de obra representa um dos principais desafios nos inventários de carbono de edificações, pela natureza altamente variável das fontes de emissão envolvidas. A dificuldade de medição direta das emissões nesta etapa e a baixa rastreabilidade e controle de perdas e retrabalhos são exemplos de fatores complicadores para inventários de carbono relacionados ao canteiro de obras.

A etapa operacional dos edifícios requer previsão do consumo energético e análise das condições de uso. Simulações computacionais podem divergir do impacto real por variações, por exemplo, no comportamento do usuário, na operação e na manutenção, fatores que não se pode controlar na etapa de projeto e que fogem, também, do alcance do construtor (DE WILDE, 2014).

Como o fim de vida envolve decisões futuras (técnicas de reciclagem, tecnologias de demolição, reúso eventual de materiais e componentes construtivos), a incerteza nas previsões tende a ser maior do que em etapas mais “próximas” da etapa de projeto.

Em resumo, é desafiadora a realização de um inventário consistente que consiga refletir de forma fidedigna uma fotografia das emissões de um empreendimento durante seu ciclo de vida, mediante as diversas variáveis que ultrapassam o controle de empresas.

3. EMISSÕES DE GEE DE EDIFICAÇÕES – ABORDAGEM VIA ETAPAS DO EMPREENDIMENTO E PROTOCOLO GHG

3.1 - Emissões ao longo do ciclo de vida das edificações

Na natureza, os seres vivos atravessam diversas etapas, do nascimento ao fim de vida, durante as quais crescem, se alimentam, procriam e envelhecem, até o momento em que deixam de existir em funcionamento vital e morrem. Chama-se a este processo de “ciclo de vida”. Segundo Odum e Barrett (2011), o ciclo de vida corresponde a estágios sequenciais e interdependentes de desenvolvimento e transformação com fluxos de matéria e energia em sistemas abertos.

Os produtos também podem ter seus percursos de existência organizados de maneira parecida com o que se chama de “ciclo de vida”. A norma ABNT ISO 14040:2025 Emenda 1 – *Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura* - define ciclo de vida como "etapas consecutivas e interligadas de um sistema de produtos, desde a aquisição de matéria-prima ou geração a partir de recursos naturais até a disposição final" (ABNT, 2025). Segundo a mesma norma, avaliação do ciclo de vida (ACV) é a “compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida”.

Portanto, mecanismos padronizados de compilação de dados de impactos ambientais podem ser aplicados aos edifícios e seu ciclo de vida. Segundo a norma europeia BS EN 15978:2011- *Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method*, o ciclo de vida de uma edificação é dividido em módulos agrupados por fases, da seguinte maneira (EN, 2011 *apud* LIANG et al., 2023)):

Módulos A (Produto + construção)

- A1: Extração e processamento de matérias-primas
- A2: Transporte de matérias-primas até fábrica
- A3: Fabricação de produtos de construção
- A4: Transporte de produtos até o local da obra / canteiro
- A5: Construção e instalação no local da obra

Módulos B (Uso / utilização)

- B1: Uso dos produtos instalados
- B2: Manutenção
- B3: Reparação
- B4: Substituição
- B5: Reforma / Reabilitação
- B6: Uso de energia operacional
- B7: Uso de água operacional

Módulos C (Fim de vida)

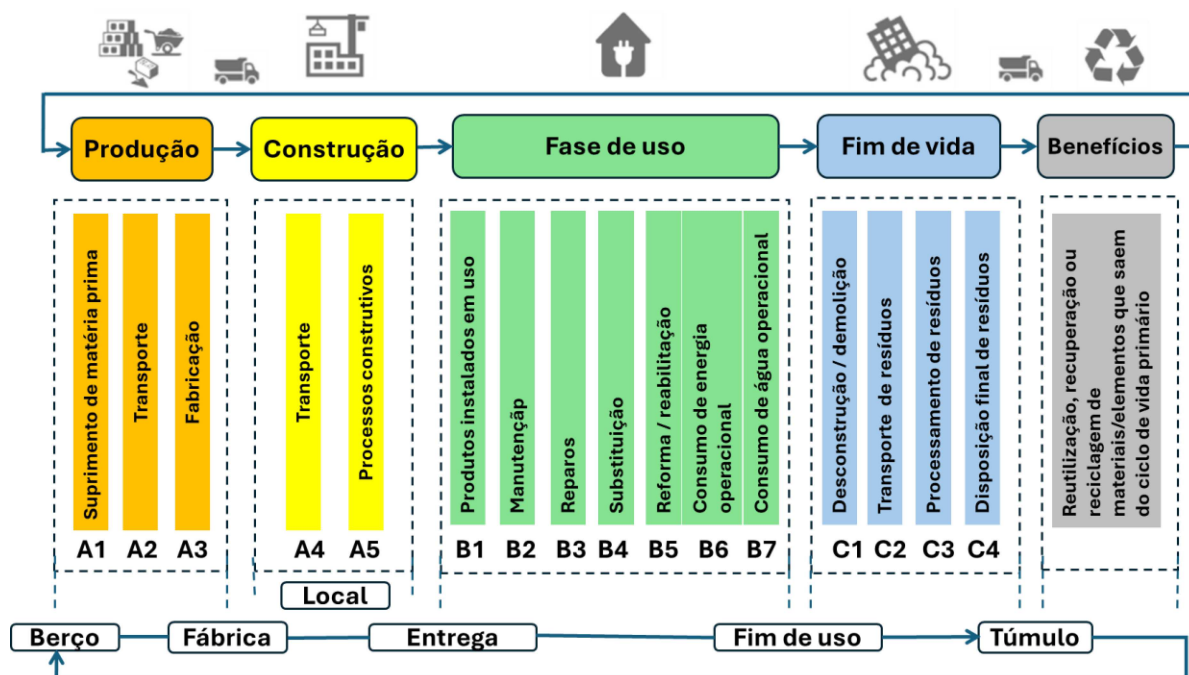
- C1: Desconstrução / demolição
- C2: Transporte para tratamento de resíduos
- C3: Processamento de resíduos (recuperação / reciclagem)
- C4: Disposição final de resíduos

Módulo D (Além do sistema: benefícios e cargas evitadas)

- D: Reutilização, recuperação ou reciclagem de materiais/elementos que saem do ciclo de vida primário → benefícios ambientais atribuíveis.

A Figura 2 ilustra esta divisão do ciclo de vida por fases e módulos.

Figura 2 – Agrupamento de módulos e fases do ciclo de vida de uma edificação de acordo com a norma BS EN 15978:2011.



Fonte : Adaptado de LIANG et al. (2023).

Segundo o IPCC (2022) as emissões de GEE das edificações podem ser derivadas, principalmente, de duas fontes:

Emissões incorporadas: relacionadas à produção, transporte e descarte de materiais de construção.

Emissões operacionais: resultantes do uso de energia durante a vida útil da edificação, especialmente para aquecimento, resfriamento, iluminação e equipamentos.

No entanto, há maneiras distintas de se organizar e classificar esses conceitos de acordo com o tipo de abordagem metodológica, como é exposto a seguir.

3.2 - Emissões de acordo com o *GHG Protocol* aplicado a edificações

O Protocolo GHG (*GHG Protocol*, em inglês) define padrões globais para medir e gerenciar emissões de gases de efeito estufa em operações e cadeias de valor. Fruto de 20 anos de parceria entre o *World Resources Institute* (WRI) e o Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD), atua junto a governos, associações industriais, ONGs, empresas e demais organizações, sendo o sistema mais usado e reconhecido no mundo para quantificação, reporte e gestão de emissões de gases de efeito estufa. Foi criado no final da década de 1990 pelo WRI e WBCSD, diante da

necessidade de um padrão internacional para contabilização e reporte de GEE corporativos. O Acordo de Paris, firmado em 2015 pela UNFCCC, exige que os países limitem o aquecimento global e intensifiquem ações para adaptação e mitigação. Assim, o GHG Protocol desenvolve normas e ferramentas online para ajudar países e cidades a monitorarem seus avanços climáticos. (GHG Protocol, 2025).

O documento “*WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT - GHG Protocol for the Building Sector: Guide for Accounting and Reporting*” (WRI/WBCSD, 2004) organiza as emissões por categorias, denominadas “escopos”, da seguinte maneira:

Escopo 1 – Emissões diretas:

Emissões de GEE provenientes de fontes que pertencem ou são controladas pela organização (ex.: combustão de combustíveis em caldeiras, veículos, geradores).

Escopo 2 – Emissões indiretas de energia:

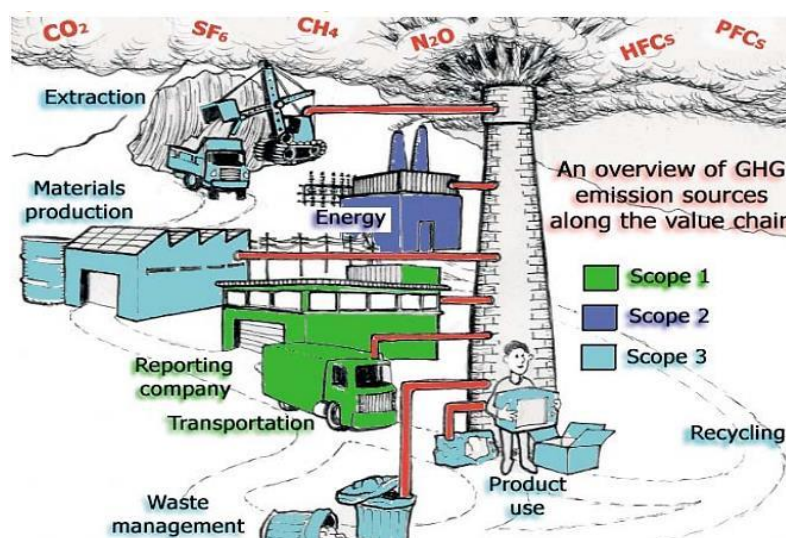
Emissões de GEE associadas à geração de eletricidade, vapor, aquecimento ou resfriamento adquiridos e consumidos pela organização.

Escopo 3 – Outras emissões indiretas:

Todas as outras emissões indiretas que ocorrem na cadeia de valor da organização, tanto a montante quanto a jusante (ex.: produção de materiais adquiridos, transporte, uso e disposição de produtos).

As categorias descritas são ilustradas na Figura 3.

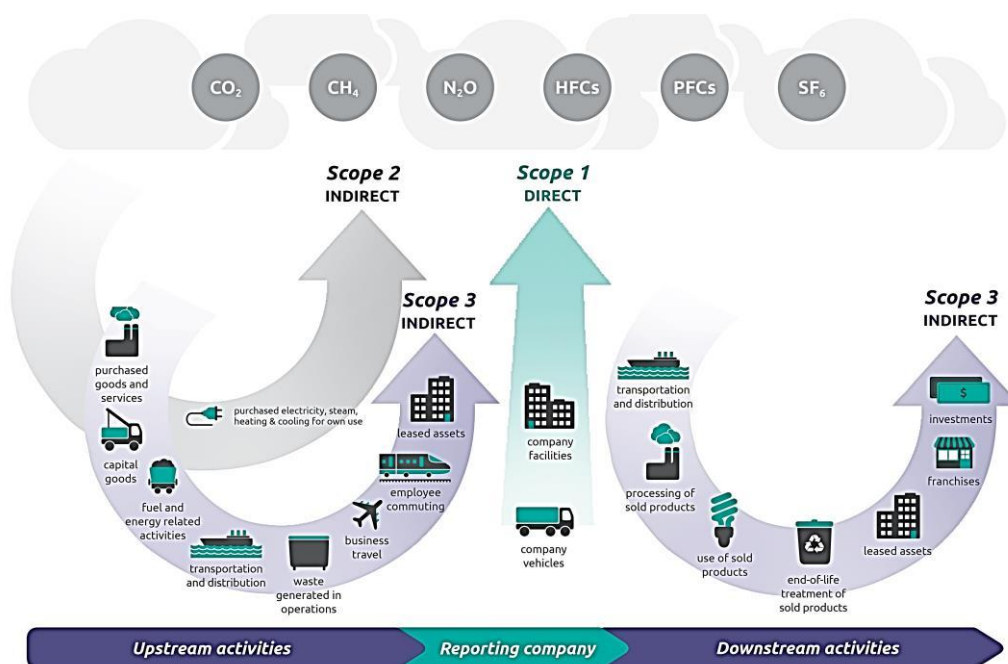
Figura 3 – Categorias de emissões segundo o WRI/WBCSD (2004).



Fonte: World Resources Institute; World Business Council for Sustainable Development (2004)

A Figura 4 é clássica – consta no diagrama de escopos do GHG Protocol (WRI; WBCSD, 2013, p. 6), organizada de modo a esclarecer o que são os escopos e as atividades a montante (*upstream activities*) e a jusante (*downstream activities*), na cadeia de valor da empresa, em relação às emissões de sua responsabilidade direta da (*reporting company*).

Figura 4 – Escopos do GHG Protocol segundo a cadeia de valor de uma empresa.



Fonte: WRI; WBCSD (2013)

3.2.1 - GHG Protocol no mercado brasileiro de construção civil

O Sindicato da Construção Civil de São Paulo, SindusCon-SP, incentivado por construtoras associadas interessadas em discutir e elaborar um instrumento que pudesse norteá-las na elaboração de seus inventários de carbono, promoveu a publicação do “Guia Metodológico para Inventários de Emissões de Gases de Efeito Estufa na Construção Civil – Setor Edificações” (SINDUSCON-SP, 2013). A publicação teve o apoio institucional da CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, da Secretaria Estadual do Meio Ambiente-SP e da Caixa Econômica Federal e tem o objetivo de “orientar a execução do Inventário de Emissões de GEE pelas empresas que operam no setor da Construção Civil, sejam elas construtoras, incorporadoras, ou uma combinação de ambos” (SindusCon-SP, 2013). É um documento elaborado no âmbito do maior mercado de construção de edificações do país, iniciativa do setor quanto aos impactos provocados no meio ambiente, com base nos princípios, recomendações e especificações

do GHG Protocol e da norma ABNT NBR ISO 14064-1:2022 – “Gases de efeito estufa - Parte 1: Especificação com orientação no nível da organização para quantificação e notificação de emissões e remoções de gases de efeito estufa”.

A publicação do SindusCon-SP define que “**a unidade organizacional básica para o Inventário é a Obra**” e que a “atividade inventariada em cada Obra é a construção de um Empreendimento, que tem lugar desde seu início até sua entrega aos usuários.” (SINDUSCON-SP, 2013). Neste sentido, a Tabela 5 reúne uma caracterização dos Escopos 1, 2 e 3 para a Construção Civil, de acordo com essa definição.

Tabela 5 – Escopos do GHG Protocolo e exemplos de fontes de emissão de GEE.

Escopo	Exemplos de Fontes Emissoras nas Obras
ESCOPO 1 – Emissões diretas	Queima de combustíveis – Consumo de combustíveis em equipamentos da empresa (próprios ou locados) sob sua gestão. Transporte com veículos da empresa – Emissões associadas ao uso de veículos próprios ou controlados. Supressão de vegetação – Emissões pela mudança de uso do solo no canteiro. Tratamento de efluentes e resíduos – Gerados por sistemas de tratamento operados na obra. Outros processos – Outras emissões diretas provenientes de processos próprios das obras.
ESCOPO 2 – Emissões indiretas de energia	Energia adquirida – Emissões associadas à geração da energia elétrica ou térmica consumida pela obra.
ESCOPO 3 – Outras emissões indiretas	Queima de combustíveis por terceiros – em equipamentos de empreiteiros. Fretes diversos contratados – transporte de funcionários e transporte administrativo. Viagens aéreas a negócios – voos realizados a serviço. Destinação de efluentes e resíduos – Tratamento/remoção por terceiros. Fabricação de materiais aplicados – Emissões da produção dos principais materiais utilizados. Frete de materiais – Transporte custeado por fornecedores ou contratado pela empresa.

Fonte: SindusCon-SP (2013)

Todo recorte, embora útil para análises com objetivo bem definido, carrega consigo uma limitação. A publicação do SindusCon-SP é extremamente importante para o setor como avanço no tratamento de questões ambientais, mas, considerando-se o ciclo de vida das edificações, é ainda limitada em termos de alcance dos resultados esperados com a metodologia empregada.

Para a realidade brasileira, pode-se estimar a participação de cada escopo do GHG Protocolo utilizando-se dados da plataforma da Fundação Getúlio Vargas (FGV, 2024a),

em especial do Registro Público de Emissões, pioneira no país para divulgação de forma transparente dos inventários corporativos de GEE das organizações que desejam participar do Programa Brasileiro GHG Protocol (FGV, 2024b).

Em pesquisa realizada na plataforma para o setor de atividade “construção”, subsetor de “construção de edifícios”, foram encontrados inventários de onze empresas de diferentes portes. A Tabela 6 mostra a participação de duas empresas do ramo de construção civil, cujos inventários são bastante significativos quanto à ordem de grandeza dos escopos em empresas de grande porte nacionais.

Tabela 6 - Inventários de emissões de 2023 com base do GHG Protocol de construtoras.

Empresa	Escopo 1 (%)	Escopo 2 (%)	Escopo 3 (%)
Moura Dubeux Engenharia S/A	1,57	0,209	98,22
MRV Engenharia e Participações S.A.	4,46	0,066	94,88

Fonte: Autor (2026).

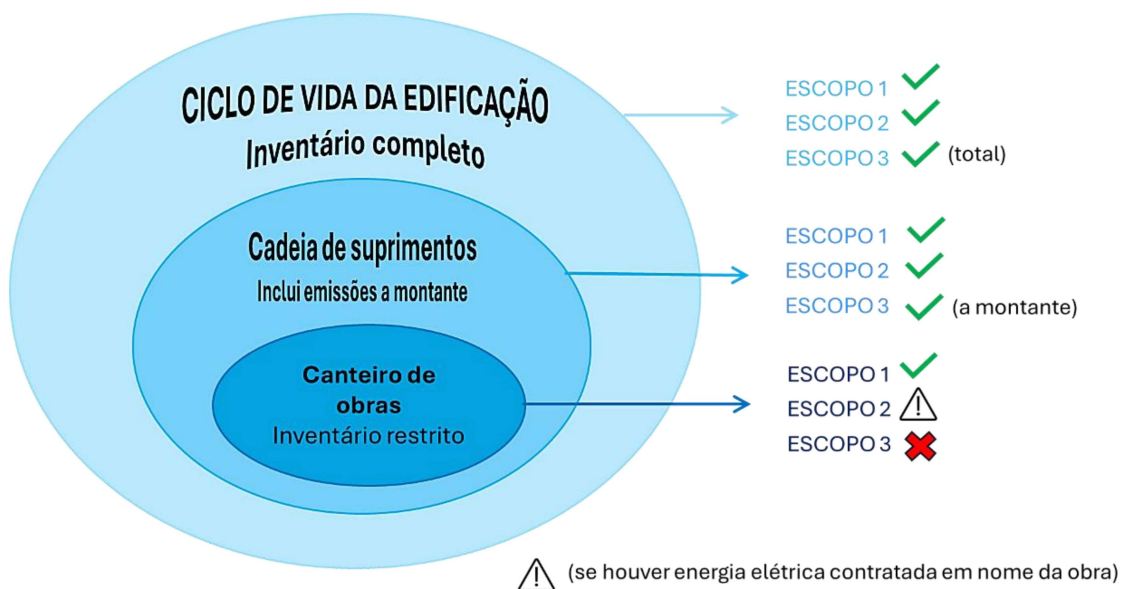
As emissões dos escopos 1 e 2, sendo aquelas que estão sob o controle dos construtores, situação comum entre empresa do setor conforme informado por Oliveira (2023), permitem compensação de 100% de seus passivos ambientais. Por outro lado, as de escopo 3 que a empresa não controla, como as de louça sanitária, torneiras, cabos elétricos, pisos cerâmicos, vidros, etc.) e as de fornecedores de materiais (concreto usinado, argamassa estabilizada, areia, brita, cimento, aço, etc.) ou serviços (profissionais terceirizados: eletricitista, bombeiro hidráulico, serralheiro, transporte de resíduos, etc.), não precisam ser contabilizadas em um inventário de emissões das construtoras, pois compreende-se que esse passivo ambiental passa a ser contemplado com a aprovação da Lei nº15.042 (BRASIL, 2024a).

A possibilidade de exclusão citada no parágrafo anterior é corroborada pelo IPCC, GHG Protocol e ABNT NBR ISO 14.064-1, segundo o Sinduscon-SP (2022), com o intuito de assegurar que o inventário de GEE reflita adequadamente as emissões de GEE de cada empresa dentro de limites apropriadamente definidos, considerando a sua relevância e razoabilidade. Conforme o modelo proposto pelo Sinduscon-SP (2022), no “Guia metodológico para inventários de emissões de gases de efeito estufa na construção civil – Setor edificações” (SINDUSCON-SP, 2022) esta interpretação colabora também para a minimização do risco de bitributação do CO_{2e}, já que inventário ocorre somente dentro dos limites físicos da obra, do início até a entrega aos usuários.

Neste caso, são exemplos de itens com possibilidade de inventário, sob controle da empresa e produzidos diretamente no canteiro de obra para o Escopo 1: argamassa e concreto produzido de forma mecanizada no canteiro de obra, formas de madeiras utilizadas na confecção da estrutura, esquadrias produzidas de forma artesanal no canteiro (PVC, alumínio, madeira), combustível da frota de veículos da empresa destinado ao empreendimento, combustível de sistemas de geradores. Para o Escopo 2, tem-se: consumo de energia elétrica e de água potável.

A proposta de abrangência para o presente trabalho difere daquela sugerida pelo SindusCon-SP. Discutem-se emissões durante o ciclo de vida das edificações e não só aquelas do canteiro de obras. A Figura 5 representa diferentes níveis de abrangência de inventários de gases de efeito estufa (GEE) aplicáveis à construção de edificações. Os anéis representam expansões da fronteira de contabilização. O círculo interno corresponde a inventários restritos ao canteiro de obras, enquanto os anéis externos indicam a ampliação progressiva das fronteiras do inventário para incluir emissões indiretas da cadeia de suprimentos (Escopo 3 – a montante) e, por fim, as emissões associadas ao uso e ao fim de vida da edificação (Escopo 3 – a jusante).

Figura 5 – Níveis de abrangência de inventários GEE aplicáveis à construção de edificações



Fonte : Elaborado pelo autor (2026)

3.2.2 - Emissões das edificações e o fator tempo

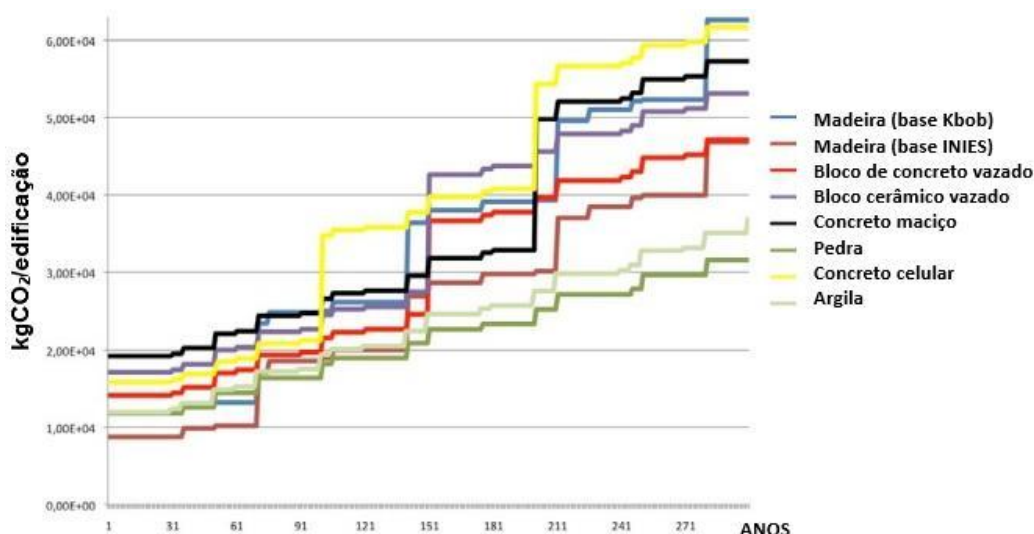
O entendimento dos impactos ambientais das edificações passa, como mostrado nos itens anteriores, pela distribuição nas diversas fases do empreendimento, isto é, de

seu ciclo de vida. Essa distribuição deve, também, incluir o fator tempo, visto que cada empreendimento terá um tempo previsto de vida útil (VUP – vida útil de projeto) – 50, 100, 200 anos... O passar do tempo implica na manutenção e em trocas de elementos e componentes construtivos, por desgaste, obsolescência ou evento inesperado, que implicam em consumo de energia, materiais e, conseqüentemente, em mais emissões de GEE.

Mequignon (2011), em sua tese de doutorado intitulada *Comment la durée de vie des bâtiments peut-elle influencer les performances en termes de développement soutenable?* (“De que forma a vida útil dos edifícios pode influenciar o seu desempenho em termos de desenvolvimento sustentável?”), traz uma análise da influência de diferentes tipos de paredes no consumo de energia e emissões de GEE ao longo do tempo em uma habitação unifamiliar. O autor incluiu, em seu estudo, o cálculo das emissões de GEE referentes a trocas e manutenções das soluções construtivas avaliadas, mostrando que alternativas consideradas de baixo impacto no curto prazo podem se tornar de impacto relativo intermediário ou até superior com o passar dos anos – as projeções consideraram cenários de até 300 anos de vida útil das edificações – Figura 6. Ressaltou, contudo, que a maior parte dos estudos considera tempos de vida útil menores, como 50 anos.

Algumas ressalvas foram feitas por Mequignon (2011) na análise, destacando que, com o passar dos anos, a evolução dos materiais, processos produtivos, tecnologias, disponibilidade de matéria prima, exigências de desempenho dos edifícios etc. irá modificar as conclusões do presente.

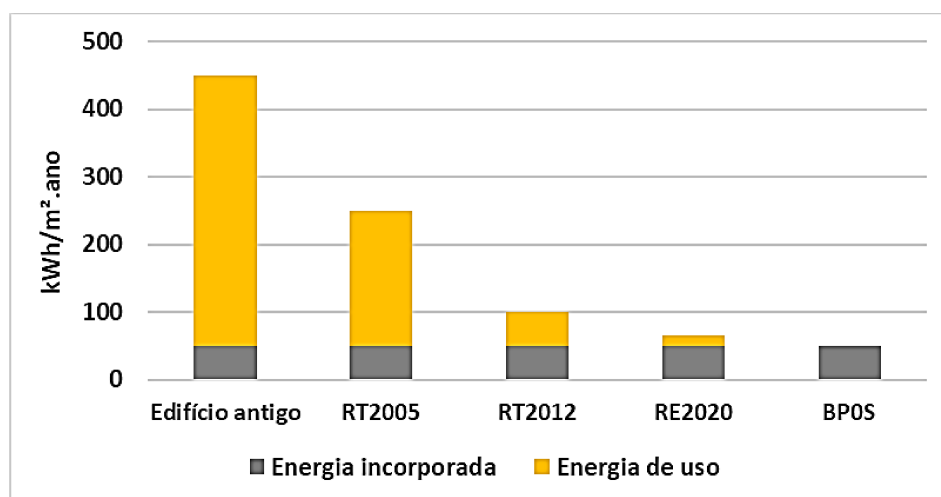
Figura 6 – Emissões acumuladas de GEE x tempo de vida útil para diferentes tipos de paredes.



Fonte: Adaptado de Mequignon et al. (2013)

Parte das ressalvas mencionadas por Mequignon (2011) são também destacadas em ARENE (2012), que mostra a evolução das RT's (regulamentações térmicas) francesas para edificações (Figura 7), cujas exigências para a melhoria do desempenho térmico dos edifícios tornam a energia incorporada dos materiais de construção cada vez maiores, proporcionalmente, em relação à energia de uso, até representarem o total das emissões para as edificações que geram energia ("BPOS", na Figura 7).

Figura 7 – Evolução das normas francesas de desempenho térmico de edificações e as proporções entre energia operacional e energia incorporada.



Fonte: Adaptado de ARENE (2012)

O fator tempo nos estudos de impactos ambientais das edificações reforça a importância da etapa de projeto dos empreendimentos, uma vez que as escolhas dos materiais nesta são determinantes para a intensidade dos resultados futuros. Objetivando melhores escolhas, fatalmente o processo recai sobre a comparação entre materiais e soluções construtivas de menor quantidade de CO₂ incorporado, classificadas como Escopo 3 no item anterior do presente trabalho.

Embora não seja objeto de abordagem central no presente trabalho, deve-se mencionar, para a fase de projeto, a importância de não se negligenciar possíveis impactos relacionados à qualidade interna dos ambientes no médio e longo prazos, a partir do fato de que muitos ambientes podem se tornar insalubres por falta de renovação de ar causada por excesso de isolamento, juntamente a emissões de componentes voláteis orgânicos derivados de petróleo em tintas, vernizes, carpetes, cortinas etc.

4. MODELOS DE MITIGAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS

Segundo Moreti et al. (2017), medidas de mitigação de impactos ambientais são comuns mundialmente. No Brasil, as avaliações de impactos ambientais (AIA) seguem a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), Lei nº 6.938 de 31 de agosto de 1981 e complementadas no Estado de Minas Gerais pela Lei nº 21.972 de 21 de janeiro de 2016. A neutralização ou compensação de emissões de CO_{2e} é uma abordagem recente proposta por instituições internacionais para mitigar mudanças climáticas causadas por atividades humanas. Esta ideia visa não aumentar as emissões ao produzir bens e serviços, permitindo que todas as emissões necessárias sejam compensadas pelo agente emissor.

Segundo o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação não existe uma regra clara, no presente momento, na legislação brasileira, sobre as possibilidades factíveis de compensação ambiental dos impactos de emissões relacionadas à construção civil (MCTI, 2022). Entretanto, existem opções relacionadas a outros setores que podem ser relacionados ao presente estudo, como implementar medidas de compensação ambiental e potencializar soluções construtivas eficientes, além de outros mecanismos como imposto ambiental e comércio de emissões, que já são realidade em outros países.

4.1 - Compensação ambiental

O mecanismo de compensação ambiental, previsto na Lei Federal nº 9.985/2000, que institui o Sistema Nacional de Unidade de Conservação da Natureza, não tem como objetivo compensar diretamente o uso autorizado de determinado recurso natural ou impacto ambiental indispensável para um empreendimento e registrado por meio do um Estudo de Impacto Ambiental (EIA), mas compensar a sociedade e o meio ambiente apoiando iniciativas que promovam a preservação ambiental (ICMBio, 2024; IEF, 2024).

Existem, no mínimo, duas possibilidades de compensação ambiental direta. A primeira, relacionada à recuperação local da área degradada pelo empreendimento e, a segunda, por meio da fixação de valor financeiro a ser desembolsado pelo empreendedor para permissão de operação de seu empreendimento. Na segunda opção, a arrecadação será direcionada para unidades de conservação indicadas pelo órgão licenciador, a partir do grau de impacto do empreendimento e de critérios técnicos próprios para definição das unidades elegíveis. O Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, por exemplo, ao receber os recursos, executa a manutenção e/ou conservação de unidades

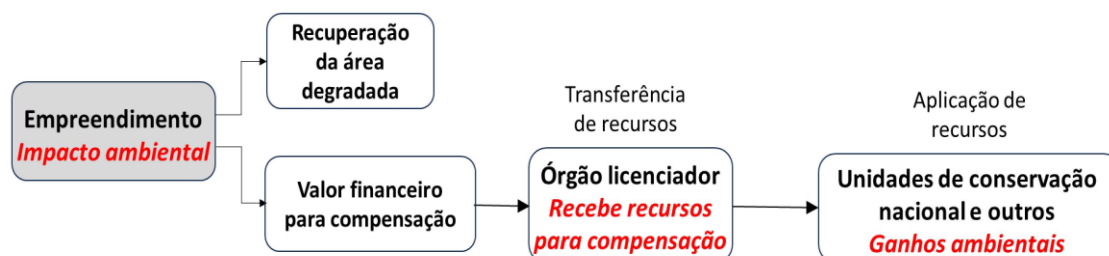
instituídas pela União, observando exatamente a destinação dada pelos órgãos licenciadores federal, estaduais, municipais ou distrital (ICMBio, 2024).

A possibilidade de adotar um valor financeiro a ser pago pelo empreendedor é aplicável somente nas condições de impossibilidade de se adotarem medidas capazes de eliminar ou reduzir, suficientemente, os impactos ambientais da atividade (IEF, 2024). Essa possibilidade de compensação se aplica atualmente em acidentes ambientais provenientes de mineradoras, fábricas, indústrias e setor de transportes ou durante a necessidade de obtenção de licenças para empreendimentos de grande porte e alto impacto ambiental.

Alternativas de compensação ambiental de forma indireta a serem exploradas estão relacionadas à reposição florestal, que pode ser feita por meio da doação de mudas para projetos de terceiros ou para áreas de preservação permanente (APPs) fora do terreno do empreendimento (BRASIL, 2012). Adicionalmente, destaca-se a Aquisição de Cotas de Reserva Ambiental (CRA), em que o empreendedor causador do passivo ambiental pode comprar esses títulos, financiando a manutenção daquela floresta existente em vez de plantar uma nova (BRASIL, 2024c), bem como a doação de terra para unidades de conservação ou a criação de servidão ambiental, entre outros.

A Figura 8 mostra, esquematicamente, como funciona o mecanismo de compensação ambiental, em que o empreendimento apresenta ao órgão licenciador o que deseja realizar e, após avaliação de técnicos especialistas do impacto do empreendimento, se estabelece a necessidade ou não de reparos ao meio ambiente diretamente no local da atividade exploratória ou indiretamente, em unidades de conservação da união.

Figura 8 - Compensação ambiental direta – ilustração esquemática



Fonte: Autor (2025).

4.2 - Soluções construtivas eficientes

A adoção de soluções construtivas eficientes consiste em um conjunto de ações tomadas durante um empreendimento, com o intuito de minimizar os impactos ambientais

causados. Este é considerado o mecanismo mais eficaz em termos de proporcionar benefícios reais no ciclo de vida das edificações e apresenta a vantagem de estar perfeitamente ao alcance de projetistas e construtores. A escolha, por exemplo, de materiais com menor intensidade de carbono, como aço reciclado, concreto com adições minerais e madeira certificada, juntamente com telhados verdes e envoltórias que reduzem o consumo de energia, reduz de maneira sustentada o total de emissões (GBCI, 2024).

Este modelo pode ser estimulado por certificações (ex.: LEED, AQUA-HQE) e por incentivos fiscais. Por outro lado, pode representar maior custo inicial, o que seria um desafio para o mercado e dependeria de superação de barreiras por parte dos consumidores, culturalmente mais afeitos a soluções tradicionais, e requer capacitação técnica para elaboração de projetos realmente eficientes.

O mecanismo pode ser dividido em dois grupos. O primeiro diz respeito à seleção de materiais eficientes para reduzir o consumo e emissões da habitação durante a construção (SCHUSTER et al., 2019; LOPES, 2023). O segundo se refere a adicionar à construção soluções que podem funcionar durante todo o ciclo de vida da construção para, por exemplo, a gestão eficiente do consumo de água e energia, geração própria de energia, conforto térmico, iluminação natural, reaproveitamento de água e tratamento de resíduos (BEMFICA, 2015; KOZLOSKI; VAGHETTI; SILVA, 2019). Destaca-se que esse tipo de estratégia já é comum no Brasil, país que ocupa a quarta posição no mundo em construções sustentáveis, segundo dados divulgados em 2022 pelo *U.S. Green Building Council* (USGBC) (USGBC, 2022).

A Figura 9 ilustra esquematicamente como funciona o mecanismo de soluções eficientes, em que o empreendimento apresenta alternativas de substituição ou incremento de tecnologias sustentáveis na edificação, a fim de minimizar suas emissões.

Figura 9 - Esquema simplificado de soluções construtivas eficientes.



Fonte: Autor (2025).

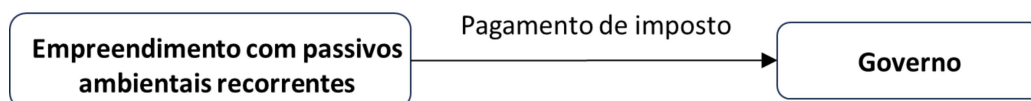
4.3 - Imposto ambiental

O mecanismo do imposto ambiental é baseado no princípio do poluidor-pagador. Segundo Bechara (2017), reforça a possibilidade de proteção ambiental baseada na prevenção, precaução e reparação/responsabilidade, como também contribui de forma justa para a distribuição dos ônus dos danos ambientais entre os agentes econômicos, parceiros comerciais e consumidores finais. Esse tipo de medida é aplicável somente em casos comprovados de que o empreendimento trará, de forma recorrente, prejuízos à sociedade e ao meio ambiente, sem possibilidades de evitá-los. Porém, por ser uma atividade essencial à sobrevivência ou desejo da sociedade, é realizada, independentemente de sua externalidade negativa (BECHARA, 2017).

Um derivativo desta concepção de imposto que surgiu nos últimos anos é o imposto de carbono (“*Carbon Tax*”), uma possível alternativa para a redução da quantidade de emissão de GEE. Porém, segundo Stavins (2020), a depender do modelo adotado o imposto pode se mostrar inefetivo para atingir metas globais.

A Figura 10 ilustra o mecanismo do imposto ambiental, em que o empreendimento com passivos ambientais recorrentes em função de sua operação recolhe um valor monetário adicional sobre seus produtos e serviços para posteriormente repassá-los ao governo como forma de compensação ao dano ambiental causado.

Figura 10 - Ilustração simplificada do imposto ambiental recorrente



Fonte: Autor (2025)

4.4 - Comércio de emissões

O comércio de emissões é um dos três mecanismos aprovados no Protocolo de Kyoto, de 1997, de forma a auxiliar os países desenvolvidos e os de economia em transição para o capitalismo a cumprirem suas metas de redução ou limitação de emissões. O comércio de emissões, conforme estabelecido no Artigo 17 do Protocolo de Kyoto (UNFCCC, 1997), permite que países que tenham unidades de emissão de sobra - emissões permitidas, mas não "usadas" - vendam esse excesso de capacidade para países que estão acima de suas metas.

Assim, uma nova mercadoria foi criada na forma de reduções ou remoções de emissões. Atualmente, o mecanismo funciona internacionalmente pelo mercado de carbono, dividido em dois grupos: i) Mercado Regulado, em que é obrigatório que haja a participação de governos para que possam comercializar a commodity digital entre si e cobrar dos setores que ele regulamenta (energia, saneamento, aviação, transporte, mineração, etc.) a adoção de tal sistema; ii) Mercado Voluntário, em que empresas e grupos de pessoas organizadas aderem à política de comercialização do produto digital ("créditos de carbono"), independentemente de haver uma cobrança de regulamentação formal entre países ou do setor em que atuam (VARGAS; DELAZERI; FERREIRA, 2021; AZEVEDO, 2024).

A quantidade a ser comercializada está atrelada aos limites estabelecidos em convenções internacionais, para que determinados segmentos de produção de um país possam emitir gases do efeito estufa, em toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO_2e), (VARGAS; DELAZERI; FERREIRA, 2021; AZEVEDO, 2024).

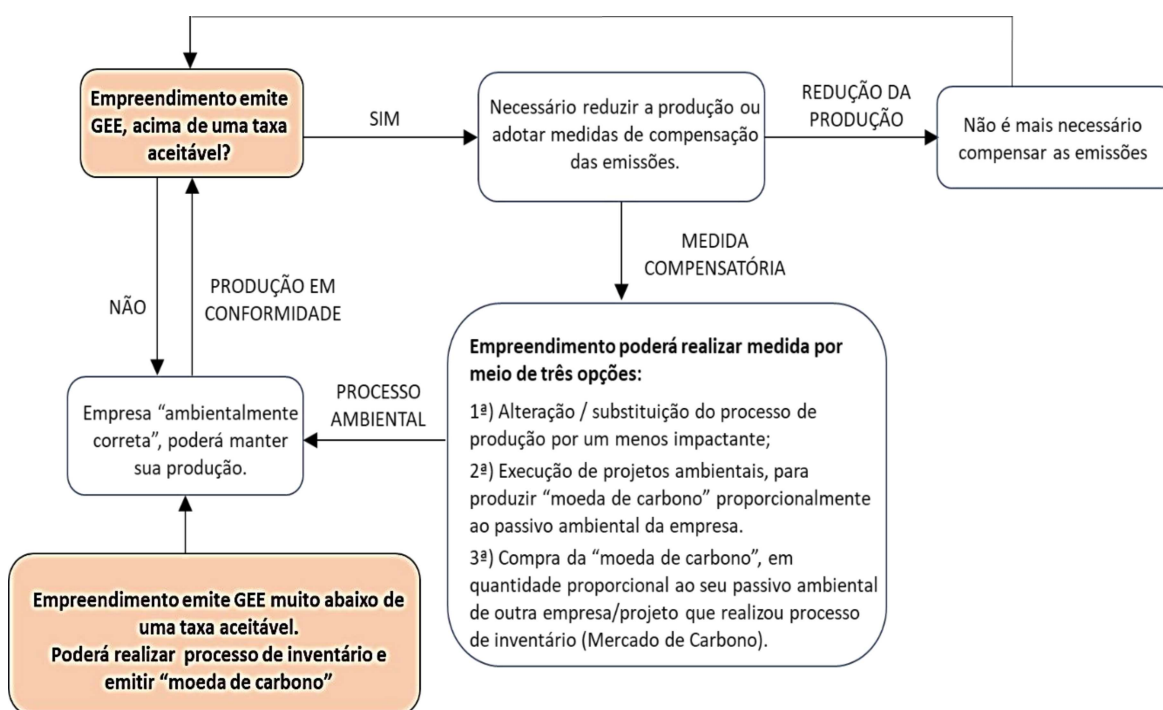
Governos e empresas que excedem os limites de emissão de GEE definidos por acordos internacionais podem adquirir licenças conhecidas como "direito de poluir". Essas licenças funcionam como um imposto ambiental, permitindo que emissores paguem para continuar poluindo. As licenças são compradas de países ou empresas que reduziram suas emissões abaixo dos limites estabelecidos pela ONU ou de projetos ambientais que capturam CO_2e , através da conservação de florestas, reflorestamento,

reaproveitamento de resíduos e de gás metano (VARGAS; DELAZERI; FERREIRA, 2021; AZEVEDO, 2024).

O mecanismo de comércio previsto pelo IPCC permite que os limites estabelecidos durante as convenções internacionais sejam alcançados com base nos custos de mercado, ou seja, conforme a lei da oferta e demanda. Em uma primeira fase, não é prevista a regulamentação dos preços. Dessa forma, quanto maior a disponibilidade dessa mercadoria digital em plataformas de comércio, menores serão os preços, até um limite sustentável. É necessário que o valor praticado cubra os custos dos projetos ambientais e dos processos de licenciamento da mercadoria nas plataformas, feito por instituições credenciadas.

A Figura 11 busca explicar, de forma ilustrativa, o comércio de emissões.

Figura 11 - O mercado de crédito de carbono.



Fonte: Autor (2025).

Em um primeiro cenário, um governo ou empresa privada emite, em suas atividades, uma quantidade de GEE abaixo de um valor pré-determinado em acordos internacionais. A partir do ponto em que resolve ampliar a sua capacidade de produção, emitindo GEE acima de um valor pré-determinado em acordos internacionais, forma-se um segundo cenário: é preciso reduzir novamente sua capacidade de produção ou comprar o “direito de poluir”, a fim de atender às demandas de produção para governos ou

população. Uma terceira condição para um governo ou empresa é aquela que se detém tecnologia alternativa e emite pouco GEE, abaixo dos limites pré-determinado em acordos internacionais – neste caso, poderá contratar um processo de licenciamento de seus “créditos de carbono” e oferecê-los no mercado, para que outras empresas que não conseguem atender à taxa-limite de GEE possam comprar o certificado. Finalmente, um governo ou empresa, ao comprar o “direito de poluir”, poderá manter ou mesmo aumentar a sua capacidade de produção e deverá sempre adquirir novos títulos, conforme sua necessidade.

É esperado que a regulamentação deste mercado, que no contexto brasileiro ocorre pela Lei 15.042, de 2024, possibilite que surjam novos investidores interessados em realizar aplicações do capital em projetos ambientais, assim como a criação de novas tecnologias de produção, com o objetivo de obter retornos financeiros nas áreas de: restauração florestal; agrofloresta; desmonte de esquema de desmatamento; processos de captura de gás metano de aterros sanitários; atualização e *retrofit* de frotas de veículos movidos a combustíveis fósseis e busca por motores mais eficientes; geração de energias alternativas, entre outros.

A principal meta da Lei 15.042, de 2024, que institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE) (BRASIL, 2024a), é garantir o cumprimento dos acordos internacionais sobre limites e comércio de emissões, discutidos em conferências ambientais como Estocolmo, Rio-92, Rio+10, COP15, Rio+20, COP21 e COP26, transformando-os em lei nacional. O descumprimento desses tratados pode acarretar sanções técnicas, como restrições ao comércio internacional, taxaões e corte de financiamentos. O mercado de carbono permite que empresas e países compensem as emissões por meio da compra de créditos vinculados a iniciativas de preservação ambiental. A intenção é incentivar a redução das emissões poluentes e amenizar as mudanças climáticas.

Ao permitir o comércio de créditos de carbono, a lei não proíbe a poluição, mas exige que ela seja contabilizada por metodologias aprovadas pelo SBCE, transformando passivos ambientais em “moeda de crédito”. À medida que as agendas internacionais avançam na definição de limites, caberá ao SBCE revisar normas e metas anuais.

A rede de comércio será formada por projetos de geração ou sequestro de emissões, organizados por entidades públicas ou privadas registradas no SBCE. A legislação busca transformar o crédito de carbono em uma commodity negociável,

controlando a emissão e a comercialização da “moeda de carbono”, enquanto define mecanismos de estabilização de preços atrativos para mercados globais. No início da implementação, intenciona-se não apenas a venda de créditos, mas atrair investidores e testar o modelo, com o objetivo final de condicionar o desenvolvimento nacional às metas globais de emissões.

O Art. 30 define limites por instalação ou fontes de emissão (acima de 10.000 t CO_{2e} e acima de 25.000 t CO_{2e} por ano), a partir dos quais deve-se prestar contas ao SBCE sobre suas medidas compensatórias em prazos definidos. O não cumprimento das metas exige a compra de ativos financeiros do SBCE (Cota Brasileira de Emissões – CBE – ou Certificado de Redução ou Remoção de Emissões - CRVEs) para compensação, funcionando como “moeda de troca” para saldar passivos ambientais.

Importante destacar que os custos desses ativos poderão repassados ao consumidor, seguindo o princípio do poluidor-pagador. Cabe ao consumidor avaliar se deseja financiar tais estruturas, mesmo sem opção de recusa, sobretudo quando envolvem bens essenciais.

Em síntese, a Lei regulamenta órgãos públicos e empresas emissoras quanto aos limites permitidos, formaliza o órgão fiscalizador e estabelece critérios baseados em metodologias internacionais via SBCE. Considerando que o maior comprador é o Estado, a regulamentação é crucial para viabilizar acordos internacionais, visto que o mercado voluntário representa menos de 1% do setor, segundo Forest Trends (2022) e Azevedo (2024). Assim, a criação de um mercado regulado, abrangendo governos, empresas e setores da economia, é fundamental para consolidar o mercado verde.

A partir das possibilidades apresentadas, será explorada, no presente trabalho, uma forma de compilação dessas informações que resulte em um mecanismo de compensação para o setor de construção civil, especificamente para as edificações.

4.5 - Selos de qualidade ambiental de edificações como referência para soluções mitigadoras de emissões de GEE

Os selos de certificação ambiental de edificações estão no mercado de construção civil há tempos. Desenvolvidos com o propósito de melhorar diversas características dos projetos e obras, avaliam a eficiência das construções do projeto até o fim de vida, passando pela qualidade do ar, gestão de resíduos, uso racional da água e pelo uso eficiente da energia, entre outros critérios. Alguns selos conhecidos no mercado nacional

foram trazidos de outros países, como o AQUA-HQE (VANZOLINI, 2024), vindo da França, e o LEED (GBC BRASIL, 2024), originário dos Estados Unidos, tendo sido contextualizados para construções e projetos no Brasil, considerando aspectos culturais, do clima, de normas técnicas e regulamentações. São sistemas voluntários de avaliação que reconhecem o desempenho ambiental das construções em todas as fases do seu ciclo de vida e estimulam boas práticas, agregam valor aos empreendimentos e podem gerar cultura empresarial na área ambiental, além de políticas públicas e incentivos no setor da construção civil.

A CAIXA, banco público federal brasileiro, com atuação de décadas no país alinhada a políticas sociais, financiando moradia, esporte, mobilidade, saneamento e saúde, criou, em 2009, o **Selo Casa Azul + CAIXA**, um “instrumento de classificação ASG (Ambiental, Social e Governança) destinado a propostas de empreendimentos habitacionais que adotem soluções eficientes na concepção, execução, uso, ocupação e manutenção das edificações” (BRASIL, 2024b). São quatro níveis de qualidade possíveis de serem alcançados, concedidos conforme a pontuação nos 50 critérios de avaliação existentes. Os critérios de avaliação estão distribuídos nas categorias “Qualidade Urbana e Bem-Estar”, “Eficiência Energética e Conforto Ambiental”, “Gestão Eficiente da Água”, “Produção Sustentável”, “Social” e “Inovação”.

Os critérios que podem efetivamente contribuir para mitigação de emissões de CO₂ são os que influenciam diretamente o consumo de energia, combustíveis, materiais ou deslocamentos. Em resumo, aqueles que reduzem as fontes de emissão ou evitam emissões.

Depreende-se, assim, que existe potencial para adoção de parte dos critérios de classificação do Selo Azul+ como referência para a elaboração de mecanismos que possam responsabilizar diretamente o empreendedor/construtor pelas emissões de GEE e dele cobrar ações mitigação ou mesmo taxas, caso um determinado número de “pontos”, eventualmente transformados em kgCO_{2e}/m², não seja alcançado. O ponto inicial mais importante é identificar quais seriam esses critérios.

Importante mencionar, de modo particular e bastante atrelado ao escopo do presente trabalho, o Selo Procel de Edificações (SPE). Estabelecido em 2014 pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), o Selo Procel de Edificações relaciona-se ao consumo de energia, com o objetivo principal de “identificar as edificações que apresentem as melhores classificações de eficiência energética,

motivando o mercado consumidor a adquirir e utilizar imóveis mais eficientes. Para obtenção do SPE é necessário, antes, obter a Etiqueta PBE Edifica, classe A, para três sistemas avaliados: envoltória, sistema de iluminação e sistema de condicionamento de ar (PROCEL Info, 2014). A avaliação da conformidade segue o Regulamento do Selo Procel de Economia de Energia, os Critérios Técnicos e os Regulamentos Técnicos da Qualidade (RTQ-C e RTQ-R) do PBE Edifica (PROCEL Info, 2014). Em edifícios comerciais, de serviços e públicos, avaliam-se envoltória, iluminação e ar-condicionado; nas residências, envoltória e aquecimento de água. Desde agosto de 2014, a Etiquetagem de Edificações tornou-se obrigatória em edifícios da Administração Pública Federal direta, autárquica e de fundações.

Complementar ao Selo Procel de Edificações (SPE), em setembro de 2022, atendendo às normas da ABNT, também foi publicada a Portaria do INMETRO nº 309, Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R) (BRASIL, 2021a). Na instrução constam os critérios e métodos utilizados para a classificação de edificações residenciais em relação à sua eficiência energética. Para o cálculo a partir da INI-R, existem três formas de estimar o consumo de energia: os métodos prescritivo, simplificado e de simulação.

Para edificações comerciais, a Portaria INMETRO nº 42, de fevereiro de 2021, trata da Instrução Normativa Inmetro para Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C). Nela, especificam-se os critérios e os métodos para a classificação de edificações comerciais, de serviços e públicas quanto à sua eficiência energética, visando à etiquetagem desse tipo de construção (BRASIL, 2021b).

Todas as normativas mencionadas anteriormente contribuem para que a Resolução nº 4, de 26 de setembro de 2025, do Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética (CGIEE), possa ser implementada de forma eficaz, estabelecendo índices mínimos obrigatórios de eficiência energética, incluindo residenciais e comerciais a partir de 2030 (BRASIL, 2025a).

A menção ao SPE se dá com o intuito de destacar que em um eventual cenário de cobrança de impostos por emissões de GEE das edificações, não deve haver duplicação de cobrança relacionada a algo já previsto, ou até mesmo já atendido pelo construtor em outra certificação obrigatória – em outros termos, não deve haver bitributação.

5. METODOLOGIA

O presente trabalho é classificado como pesquisa aplicada, de abordagem predominantemente qualitativa, de natureza exploratória, desenvolvida a partir de revisão bibliográfica, análise de normas técnicas e sistematização de dados secundários. A partir desse conjunto, propõe-se um modelo conceitual aplicado à discussão das emissões de CO₂ em edificações e à responsabilização do setor da construção civil.

A seguir, apresenta-se a descrição das etapas percorridas.

- Por meio das consultas bibliográficas realizadas, **identificar as fontes de emissão que estariam diretamente ao alcance ou sujeitas a responsabilização pelo empreendedor**, utilizando as abordagens do ciclo de vida das edificações e dos escopos do GHG Protocol. Organizar a análise de modo a destacar os impactos mais significativos em emissão de CO₂.
- Estimar uma **quantidade de CO₂ incorporado por metro quadrado** de construção, via consultas bibliográficas.
- Fazer um **cruzamento dos impactos mais importantes para o objetivo da pesquisa com os critérios de certificação do Selo Azul+ da Caixa**, possivelmente para adoção de ações mitigadoras de emissões de CO₂.
- Apresentar **vantagens e desvantagens dos modelos de mitigação** de emissões estudados.
- Construir uma ideia de **modelo de mitigação**.

Na Tabela 7 consta uma visão da lógica do trabalho, comparando o cenário predominante no mercado de construção civil brasileiro e o pensamento que levou aos objetivos da pesquisa e à elaboração da metodologia.

Tabela 7 – Cenários da abordagem predominante x modelo proposto

Dimensão	Abordagens/ características predominantes no setor	Ideia proposta
Objeto de análise	Edificação como ativo imobiliário	Edificação como unidade de impacto climático
Indicador principal	Custo da etapa de construção	Emissões em kgCO ₂ e/m ² ao longo do ciclo de vida
Margem temporal	Predominância da fase de uso	Ciclo de vida completo
Abordagem ambiental	Praticamente inexistente	ACV e EN 15978
Classificação das emissões	Pouco explorada	Escopos 1, 2 e 3 (GHG Protocol)
Responsabilidade ambiental	Diluída entre agentes	Centrada no construtor/empreendedor
Tratamento do Escopo 3	Considerado externo ao controle	Tratado como fortemente influenciável
Instrumentos econômicos	Incentivos pontuais e voluntários	Tributação com fatores redutores
Papel dos selos ambientais	Certificação voluntária	Instrumento de mitigação
Lógica cultural	Aguardar provocações do mercado ou de políticas públicas	Preventiva e indutora de adoção de soluções
Modelos de mitigação	Desconhecimento/ ilusão	Legislação / Junção de mais de um modelo
Objetivo final	Atendimento mínimo	Redução das emissões do setor

Fonte: Autor (2025)

6. RESULTADOS

6.1 - Abordagem das emissões de acordo com o ciclo de vida e com o GHG Protocol

As abordagens do tema sob as óticas do ciclo de vida da edificação e do GHG Protocol são distintas quanto a conceitos, mas podem ser complementares. Impõe-se, assim, uma questão de escolha metodológica ao se estudar o tema, merecedora de uma análise comparativa. Desta forma, uma matriz com a reunião das fases do ciclo de vida no modo clássico e resumido, com a classificação das emissões de acordo com o tipo de escopo, mais a descrição de possíveis fontes de emissão, pode ser organizada da seguinte maneira (Tabela 8):

Tabela 8 – Fontes de emissão de GEE em edificações de acordo com as fases do empreendimento e com o GHG Protocol

Fase	Escopo	Fonte de Emissão
Produção de materiais	Escopo 3	Extração de matéria prima, fabricação, transporte até o canteiro.
Construção	Escopo 1	Queima de combustível por máquinas e equipamentos no canteiro. Uso de geradores a diesel ou gás. Transporte de materiais por frota própria.
	Escopo 2	Consumo de eletricidade no canteiro (ferramentas, iluminação, escritórios provisórios).
	Escopo 3	Produção e transporte de materiais de construção (cimento, aço etc.). Transporte de trabalhadores Emissões incorporadas de equipamentos de obra (formas, andaimes etc.). Tratamento e disposição dos resíduos da obra.
	Escopo 1	Queima de gás natural, GLP ou diesel para aquecimento, cozinha ou gerador. Vazamento de fluidos refrigerantes (HFCs).
Uso (Operação)	Escopo 2	Consumo de eletricidade da rede (iluminação, climatização, elevadores etc.) Energia adquirida para aquecimento ou resfriamento central.
	Escopo 3	Manutenção e reformas (materiais e transporte). Transporte dos usuários até a edificação. Emissões indiretas do consumo interno (eletrodomésticos, equipamentos). Gestão de resíduos sólidos e esgoto.
Fim de vida	Escopo 3	Demolição, transporte de resíduos, reúso, reciclagem.

Fonte: Autor (2025)

Fica claro, com esse cruzamento de abordagens, que as emissões por escopo aparecem da seguinte forma nas fases do ciclo de vida dos edifícios:

- Produção de materiais: Escopo 3;
- Construção, de curto tempo de duração: Escopos 1, 2 e 3;
- Uso do edifício, a mais longa do ciclo de vida: Escopos 1, 2 e 3;
- Fim de vida: Escopo 3

A Tabela 9 traz novamente exemplos de fontes de emissão classificadas segundo o tipo de escopo do GHG Protocol, porém com o detalhamento das etapas do ciclo de vida de acordo com a norma BS EN 15978:2011.

Tabela 9 - Etapas do ciclo de vida de acordo com a norma EN 15978 x Escopos do GHG Protocol

Fase da ACV (EN 15978)	Escopo predominante (GHG Protocol)	Fontes de emissão (exemplos para o Brasil)	Observações sobre pontos críticos de emissão
A1 – Extração de matérias-primas	Escopo 3	Mineração de calcário, argila, areia, minério e ferro.	Impactos altos de cimento e aço
A2 – Transporte até a fábrica	Escopo 3 (ou 1 se frota própria)	Frete rodoviário/ferroviário de insumos	
A3 – Fabricação dos materiais	Escopo 3	Produção de cimento, aço, alumínio, cerâmica, vidro, tintas.	Alto carbono incorporado
A4 – Transporte até a obra	Escopo 3 (ou 1 se frota própria)	Caminhões transportando cimento, aço, blocos etc.	Frete contratado = esc.3
A5 – Construção	Escopos 1, 2, 3.	1: escavadeira, betoneira a diesel, geradores próprios. 2: eletricidade do canteiro. 3: resíduos, transporte de entulho terceirizado	Escopos 1 e 2 são “diretos” do canteiro
B1 – Uso/ocupação	Escopo depende do reportante	Se for condomínio/operador: 1 (combustível local), 2 (eletricidade comprada). Se for construtora: pode entrar como esc.3 - “uso do produto vendido”	Energia domina impactos
B2 – Manutenção	Escopo 3	Pinturas, limpezas, pequenos reparos contratados.	Impacto menor comparado ao B4
B3 – Reparo	Escopo 3	Trocas pontuais de revestimento, fixações, selantes.	Moderado
B4 – Substituição	Escopo 3	Troca de piso, janelas, louças, telhado.	Alto, em décadas.
B5 – Reabilitação	Escopo 3	Reformas estruturais, troca de sistemas prediais.	Alto, se ocorrer.
B6 – Energia operacional	Escopo 2 (ou 1 se combustível no local)	2: eletricidade da rede (maioria no Brasil). 1: gás GLP/canalizado, geradores do prédio.	Principal ponto em ACV
C1 – Demolição	Escopo 1 e 2 (da empresa que executa)	Equipamentos próprios na demolição	Se a obra contrata = escopo 3
C2 – Transporte de resíduos	Escopo 3 (ou 1 se frota própria)	Caminhões levando resíduos da demolição	Alto
C3 – Tratamento de resíduos	Escopo 3	Reciclagem de aço, britagem de concreto, tratamento de madeira.	Moderado, no ciclo de vida.
C4 – Disposição final	Escopo 3	Aterros licenciados, emissões fugitivas de decomposição	
D – Benefícios além do sistema	Escopo 3 (evitado)	Créditos por reciclagem de aço, energia evitada.	Créditos

Fonte: Autor (2026)

É possível extrair da Tabela 9:

- Nas etapas **A1–A3** (materiais: extração, produção, fábrica), quase sempre os impactos são de **Escopo 3**, majoritariamente de bens e serviços adquiridos junto à cadeia de suprimentos. Este é um grande impacto de carbono incorporado.
- A etapa **A4** (transporte até a obra) ocasiona, também, principalmente **Escopo 3** (frete terceirizados); Escopo 1, se há uso de frota própria.
- A etapa de construção - **A5** – promove impactos variados, de **Escopos 1, 2 e 3**. Os escopos 1 e 2 representam as emissões diretas da obra.
- A Etapa **B4**, de substituições e manutenções relevantes, representa **Escopo 3** para a construtora, caso estiver dentro de garantias ou manutenções contratadas.
- Etapa **B6** (energia operacional): **Escopo 2** primordialmente, relacionado a consumo de eletricidade, grande maioria no Brasil. Considerando que a construtora normalmente não opera o edifício, o impacto costuma ficar fora de inventários com foco na empresa.
- Etapas **C1–C4** (demolição, transporte, tratamento, disposição): tipicamente **Escopo 3**, de serviços contratados, pois a construtora normalmente não faz a demolição nem opera aterros.

6.2 - Distribuição das emissões de CO₂e ao longo do ciclo de vida de edificações no contexto brasileiro

As emissões das edificações podem variar de acordo com diferentes fatores, como o tipo de empreendimento (residencial, público), características construtivas que determinam o consumo de materiais (sistema estrutural, tipo de fundação, tipo de alvenaria etc.) e desempenho térmico, além de variar de acordo com o objeto inventariado, a saber, somente o canteiro de obras, o edifício propriamente dito ou a empresa. Importante acrescentar que cada estudo deve definir os limites da abordagem – berço ao portão, berço ao local, berço ao túmulo - lembrando sempre que os resultados estão intrinsecamente ligados às fontes energéticas utilizadas, isto é, à matriz energética regional, mais limpa ou menos limpa de acordo com cada país.

A distribuição das emissões de gases de efeito estufa (GEE) ao longo do ciclo de vida das edificações tem sido amplamente discutida na literatura, tanto no contexto

nacional quanto internacional. No entanto, os resultados quantitativos dos diferentes estudos mostram elevada variabilidade. Estudos brasileiros, como os de Evangelista; Torres; Gonçalves (2016), indicam que a fase de uso e operação pode concentrar parcela significativa das emissões totais de GEE, sobretudo quando se consideram tempos de vida útil mais longos e padrões de uso convencionais. Em alguns cenários, essa fase pode superar muito as emissões das fases etapas pré-operacionais, evidenciando a importância do desempenho energético ao longo da vida útil da edificação. Röck et al. (2020) e Röck; Balouktsi; Saade (2023) destacam que, à medida que estratégias de eficiência energética são incorporadas aos projetos, a participação das emissões incorporadas tende a aumentar.

A variabilidade também se observa quando se analisam as emissões sob a ótica dos escopos do GHG Protocol. Onat; Küçükvar; Tatari (2014), ao abordarem os escopos para edificações residenciais e comerciais, mostraram que a maior parte das emissões é de Escopo 3, especialmente em função da produção de materiais, do transporte e das emissões relacionadas ao uso da edificação. Esse resultado reforça a importância de se analisar também as emissões inseridas em toda a cadeia, mesmo que de menor grau de controle.

Onat; Küçükvar; Tatari (2014) quantificaram a pegada de carbono do estoque de edificações residenciais e comerciais dos Estados Unidos conforme os Escopos 1, 2 e 3 do GHG Protocol, considerando emissões diretas e indiretas ao longo do ciclo de vida (construção, uso e descarte). Os resultados revelaram que as emissões do Escopo 2 (48%) são as que apresentam a maior participação na pegada de carbono, seguidas de Escopo 3 (32%) e Escopo 1 (20%). Os mesmos autores descreveram os componentes dos escopos e suas participações gerais nos edifícios dos EUA. Entre as atividades mais representativas, a eletricidade responde por 48% da pegada de carbono, o deslocamento diário representa mais de 10% das emissões (Escopo 3) e o gás natural, principal fonte do Escopo 1, contribui com 13,5%.

Além da análise da pegada de carbono com base nos escopos, Onat; Küçükvar; Tatari (2014) também mostraram a contribuição de cada fase do ciclo de vida. A análise revelou que, nos EUA, a fase de uso dos edifícios responde por 91% das emissões totais, enquanto as fases de construção representam cerca de 11% (residenciais) e 6% (comerciais). O fim de vida tem impacto mínimo. Assim, priorizar a fase de uso na etapa de projeto é essencial para reduzir a pegada de carbono, de acordo com o estudo

apresentado. Importante ressaltar que, em países do hemisfério norte, o uso de energia é bem mais acentuado, especialmente usada para aquecimento dos ambientes.

Evangelista et al. (2018) avaliaram o desempenho ambiental de quatro residências brasileiras típicas via Análise do Ciclo de Vida (“berço ao túmulo”), considerando 50 anos de uso. O maior impacto ambiental veio do consumo energético durante a operação e do carbono incorporado nos materiais; a fase operacional respondeu por mais de 80% dos impactos, principalmente devido à eletricidade e GLP para cocção, enquanto a fase pós-operacional representou menos de 6%. Fundação, estrutura, alvenaria e revestimentos foram subsistemas críticos. No mesmo estudo, ao normalizar os impactos por m²/ano, moradias menores apresentaram impacto relativo maior devido à densidade de ocupantes, mostrando a necessidade de múltiplas perspectivas na ACV para decisões de mitigação no setor da construção. Também para o Brasil, país de clima quente, observa-se que a etapa de uso apresenta maior percentual de emissões. Reforça-se, portanto, a importância de bons projetos no que tange ao desempenho térmico das edificações ao longo do tempo.

Alencar et al. (2026), ao analisarem 15 estudos brasileiros sobre emissões de CO₂ em edificações, identificaram ampla variabilidade nos resultados. Os autores concluem que a adoção de faixas indicativas é mais apropriada do que o uso de valores pontuais para representar a distribuição das emissões no contexto nacional.

No contexto europeu, como já mencionado anteriormente, a evolução das normas de desempenho térmico e energético altera a relação entre emissões operacionais e emissões incorporada, com aumento relativo do peso das emissões relacionadas aos materiais e sistemas construtivos (MEQUIGNON, 2011), ou seja, do carbono incorporado.

Os diferentes estudos evidenciam que não existe um valor único ou “típico” para a distribuição das emissões de GEE ao longo do ciclo de vida das edificações, inclusive no contexto brasileiro. Assim, acredita-se que seja metodologicamente mais adequado trabalhar com faixas indicativas de participação das diferentes fases do ciclo de vida.

De forma geral, a literatura converge no entendimento de que:

- A **fase de uso e operação** tende a representar a maior parcela das emissões totais de GEE ao longo do ciclo de vida das edificações.

- As **emissões associadas à produção de materiais de construção** também apresentam contribuição importante, principalmente em cenários de elevada eficiência energética operacional.
- As emissões relacionadas ao **transporte de materiais** e às atividades de **canteiro de obras** tendem a representar parcelas menores, especialmente se relacionadas à responsabilidade direta do construtor.
- As fases de **manutenção, substituições e fim de vida** são de participação variável conforme a durabilidade dos sistemas construtivos, comportamento dos usuários, a qualidade da execução e as possibilidades futuras de reúso e reciclagem dos materiais (MEQUIGNON, 2011).

Com base nessas considerações, a Tabela 10 apresenta uma síntese das principais fases do ciclo de vida das edificações, relacionando-as aos escopos do GHG Protocol (WRI; WBCSD, 2004) e a faixas indicativas de participação percentual nas emissões totais de GEE, tendo como referência estudos aplicados ao contexto brasileiro (BAIOCHI; SILVA, 2021; LAMBERTS, 2022), complementados por resultados da literatura internacional (UNEP, 2023). Ressalta-se que essas faixas não representam valores médios nacionais, mas ordens de grandeza que auxiliam na compreensão, discussão e proposição de mecanismos de mitigação e responsabilização.

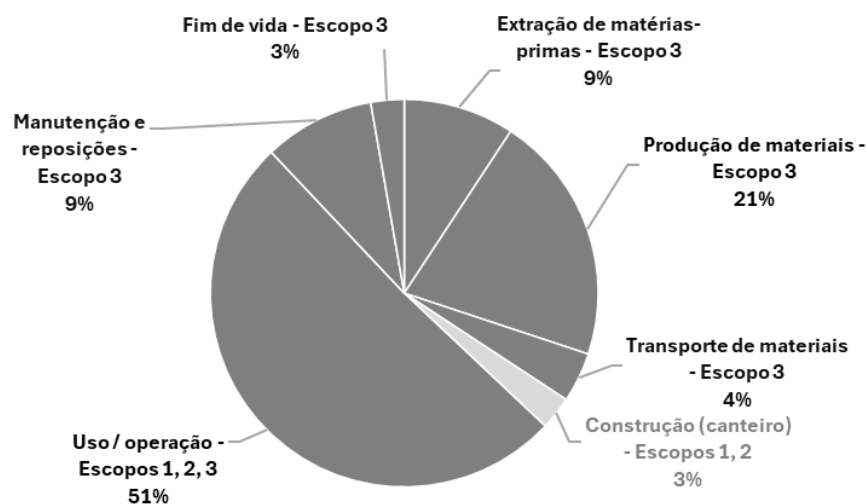
Tabela 10 - Fases do CV, classificação por escopos, faixas de participação e fatores influentes das emissões

Fase do CV	Escopo (GHG)	Faixa indicativa na literatura aplicada ao Brasil	Fatores influentes
Extração de matérias-primas	Escopo 3	5–15 %	Fora do controle direto; mitigação indireta via especificação e compras.
Produção de materiais	Escopo 3	15–30 %	Tipo de material, fornecedores, EPDs e soluções de menor carbono.
Transporte de materiais	Escopo 3	1–6 %	Logística, distâncias e modais de transporte.
Construção (canteiro)	Escopos 1 e 2	1–4 %	Gestão direta de equipamentos, combustíveis e eletricidade.
Uso / operação	Escopos 1, 2 e 3	40–70 %	Decisões de projeto determinam o desempenho energético futuro.
Manutenção e reposições	Escopo 3	5–15 %	Durabilidade, qualidade construtiva e especificações iniciais.
Fim de vida	Escopo 3	1–5 %	Demolição, transporte, reúso e reciclagem.

Fonte: Autor (2026)

Observa-se, pela soma das médias de cada intervalo de distribuição percentual da Tabela 10, que há uma acentuada predominância das emissões de Escopo 3 ao longo do CV das edificações, aquelas definidas pelo GHG Protocolo como “outras emissões indiretas”, e baixa participação daquelas de influência direta (canteiro) do construtor. Esta observação é ilustrada na Figura 12, com as médias ponderadas de cada fase do CV.

Figura 12 – Distribuição das emissões por Escopos



Fonte: Autor (2026)

6.3 - Critérios de certificação do Selo Azul+ aplicáveis a mecanismo de mitigação de emissões

O Selo Casa Azul + CAIXA apresenta características que o tornam particularmente adequado como lógica auxiliar para a formulação de mecanismos de responsabilização por impactos ambientais no setor da construção no Brasil. A origem em instituição pública, com critérios sob controle direto do empreendedor e a possibilidade de verificação técnica de suas exigências indicam seus critérios como referência. A escolha, portanto, não é porque ele é melhor em sustentabilidade do que outros selos, mas porque é o mais compatível com políticas públicas no Brasil.

A tarefa, diante dos objetivos do presente trabalho, de sugerir um modelo de mitigação de GEE de edificações usando como base uma referência já existente e sólida, é mapear os critérios do Selo Azul com aderência ao tema, isto é, diretamente ligados e potencialmente importantes para a efetivação de resultados do modelo, relacionando-os com os Escopos do GHG Protocol em cada fase do CV das edificações.

A seguir, o Quadro 2 e o Quadro 3 reúnem os critérios mapeados.

Quadro 2 - Critérios do Selo Casa Azul de responsabilidade direta do construtor e mitigadores de CO₂ - **Fase de obra**

Critério	Mitigação de CO₂	Escopo GHG (construtor)
Gestão de Resíduos da Construção e Demolição (RCD)	Reduz desperdício: evita produção adicional de cimento, aço, cerâmica; aumenta reciclagem.	Escopo 3 (resíduos e materiais adquiridos)
Coordenação modular*	Minimiza cortes, sobras e retrabalhos: redução de massa de materiais	Escopo 3
Componentes industrializados / pré-fabricados	Menos perdas e retrabalho	Escopo 3
Fôrmas e escoras reutilizáveis	Reduz consumo de madeira e materiais temporários	Escopo 3
Uso de madeira certificada	Reduz risco de emissões associadas a desmatamento e cadeias intensivas em carbono	Escopo 3
Adequação às condições do terreno	Menor volume de terraplenagem e transporte: menor consumo de combustível	Escopo 1 (se frota própria) / Escopo 3 (terceiros)
BIM aplicado à gestão integrada	Redução de erros de compatibilização de projetos - menos retrabalho, desperdício e consumo de materiais	Escopo 3 (principal)

Fonte: Autor (2026)

Quadro 3 - Critérios do Selo Casa Azul de responsabilidade direta do construtor e mitigadores de CO₂ - **Fase operacional**

Critério	Mitigação de CO₂	Escopo GHG (construtor)
Orientação ao Sol e estratégias bioclimáticas	Menor demanda de climatização artificial ao longo da vida útil	Escopo 3
Desempenho térmico e lumínico da envoltória	Menor consumo de energia elétrica para conforto térmico e iluminação	Escopo 3
Iluminação natural de áreas comuns	Redução permanente do consumo elétrico em áreas comuns	Escopo 3
Elevadores eficientes	Menor consumo de energia elétrica durante a operação do edifício	Escopo 3
Sistema de aquecimento solar	Substitui eletricidade ou gás para aquecimento de água	Escopo 3
Geração de energia renovável no empreendimento	Reduz eletricidade adquirida da rede ao longo da vida útil	Escopo 3

Fonte: Autor (2026)

6.4 - Identificação das emissões com o empreendedor

A identificação do empreendedor/construtor ou grau de influência nas decisões de gestão das diversas fases do ciclo de vida do empreendimento visando a redução de emissões de GEE pode variar de acordo com diferentes fatores. O critério central utilizado no presente trabalho é o poder de decisão sobre fatores determinantes das emissões, independentemente de quem seja o emissor direto. Esse critério está alinhado com a lógica do Escopo 3 do GHG Protocol, que inclui emissões indiretas como relevantes no protocolo.

Assim, grau de influência do construtor será considerado pertencente a uma das três seguintes categorias:

- **Forte**, quando o construtor controla diretamente escolhas técnicas com impacto nas emissões;
- **Médio**, quando o construtor influencia parcialmente, via especificações, contratos ou logística;
- **Fraco**, quando as emissões ocorrem em etapas fora do seu controle decisório.

Por exemplo:

- O empreendedor fabrica os materiais de construção? Não, mas pode realizar escolhas de menor carbono incorporado na fase de projeto – grau Médio de influência.
- O empreendedor dirige diretamente o canteiro de obras, com tomadas de decisão quanto a equipamentos, processos e técnicas construtivas mais eficientes? Sim. Forte influência.
- O construtor faz manutenção do edifício? Não, esta é uma ação futura, que depende de condições de uso, disponibilidade financeira dos usuários etc. Grau de influência Fraco.

O Quadro 4 mostra a classificação elaborada pelo autor do presente trabalho para etapas do ciclo de vida da edificação, por tipo de escopo, inicialmente aplicada em um modelo simplificado de apresentação de fases do ciclo de vida.

Quadro 4 – Classificação das ações do construtor quanto ao grau de influência na tomada de decisões para mitigação de emissões de GEE durante o ciclo de vida da edificação, por escopo.

Fase do CV	Escopo	Fonte de Emissão	Grau de influência do construtor
Produção de materiais	Escopo 3	Extração de matéria prima, fabricação, transporte até o canteiro.	Médio
Construção	Escopo 1	Queima de combustível por máquinas no canteiro.	Forte
		Uso de geradores a diesel ou gás.	Forte
		Transporte de materiais por frota própria.	Forte
	Escopo 2	Consumo de eletricidade no canteiro (ferramentas, iluminação, escritórios provisórios).	Forte
	Escopo 3	Produção e transporte de materiais de construção (cimento, aço etc.).	Médio
		Transporte de trabalhadores	Médio
		Emissões incorporadas de equipamentos de obra (formas, andaimes etc.).	Fraco
		Tratamento e disposição dos resíduos da obra.	Forte
Uso / Operação /Manutenção	Escopo 1	Queima de gás natural, GLP ou diesel para aquecimento, cozinha ou gerador.	Médio
		Vazamento de fluidos refrigerantes (HFCs).	Inexistente
	Escopo 2	Consumo de eletricidade da rede (iluminação, climatização, elevadores etc.)	Médio
		Energia adquirida para aquecimento ou resfriamento.	Médio
	Escopo 3	Manutenção e reformas (materiais e transporte).	Fraco
		Transporte dos usuários até a edificação.	Inexistente
		Emissões indiretas do consumo interno (eletrodomésticos, equipamentos).	Inexistente
		Gestão de resíduos sólidos e esgoto.	Fraco
Fim de vida	Escopo 3	Demolição, transporte de resíduos, reúso, reciclagem.	Fraco

Fonte: Autor (2026)

No Quadro 5 aplica-se a classificação ao modelo de apresentação do ciclo de vida da norma EN 15978, acrescentando-se justificativas para cada escolha.

Quadro 5 - Análise do grau de influência do construtor sobre mitigação de emissões

Fase da ACV (EN 15978)	Escopo predominante (GHG Protocol)	Grau de influência do construtor	Justificativa
Projeto (pré-construção)	Escopo 3	Forte	O construtor define sistemas construtivos, materiais, desempenho energético e vida útil dos componentes, influenciando emissões a montante e a jusante ao longo de todo o ciclo de vida, embora sem controle na fase de operação futura.
A1 – Extração de matérias-primas	Escopo 3	Médio	Influência indireta via especificação de materiais e sistemas construtivos, sem controle sobre os processos de extração.
A2 – Transporte até a fábrica	Escopo 3 (ou 1)	Fraco	Responsabilidade dos fabricantes, com limitado controle do construtor.
A3 – Fabricação dos materiais	Escopo 3	Médio	Possibilidade de escolha de materiais de menor carbono incorporado, porém sem controle do processo industrial.
A4 – Transporte até a obra	Escopo 3 (ou 1)	Médio	Decisões de logística e fornecedores regionais podem reduzir emissões, embora o transporte seja terceirizado.
A5 – Construção (canteiro de obras)	Escopos 1, 2 e 3	Forte	Controle direto sobre equipamentos, combustíveis, consumo de eletricidade e gestão de resíduos do canteiro.
B1 – Uso / Operação	Escopo 2 (ou 1/3)	Médio	Influência indireta via decisões de projeto que afetam o consumo energético futuro, sem controle sobre a operação do edifício.
B2 – Manutenção	Escopo 3	Fraco	Depende das práticas dos usuários, com influência limitada em definições no projeto.
B3 – Reparo	Escopo 3	Fraco	Relacionado à qualidade inicial da construção, com baixo controle do construtor ao longo do tempo.

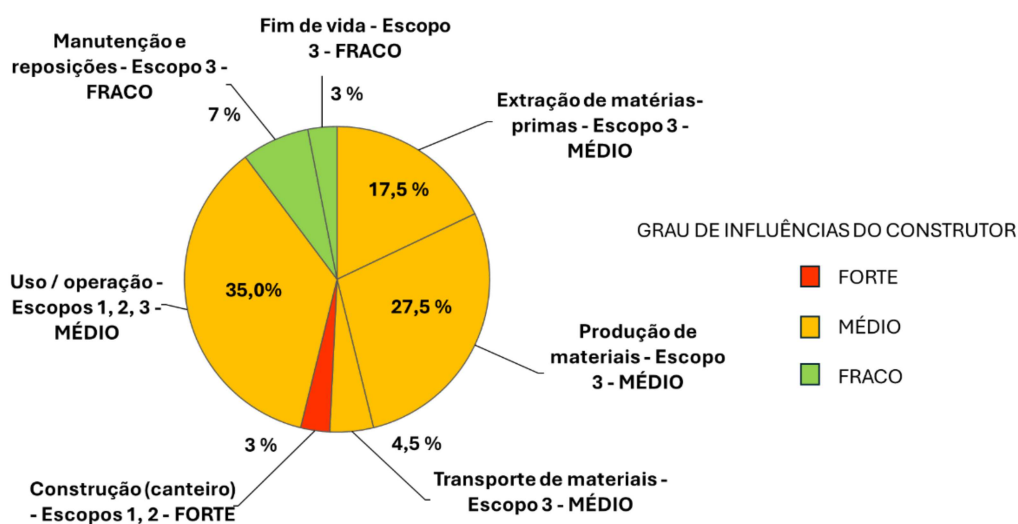
Quadro 5 - Análise do grau de influência do construtor sobre mitigação de emissões – Cont.

Fase da ACV (EN 15978)	Escopo predominante (GHG Protocol)	Grau de influência do construtor	Justificativa
B4 – Substituição	Escopo 3	Fraco	Vida útil e fatores de uso de componentes influenciam a frequência de substituições ao longo da vida útil.
B5 – Reabilitação	Escopo 3	Fraco a Médio	O projeto pode favorecer flexibilidade e adaptabilidade, mas decisões futuras dependem dos usuários/proprietários.
B6 – Energia operacional	Escopo 2 (ou 1)	Médio	Principal ponto crítico da ACV, com influência indireta do construtor por meio de definições de projeto.
C1 – Demolição	Escopos 1 e 2 (executor)	Fraco	Geralmente executada por terceiros, com influência restrita ao projeto para desmontagem.
C2 – Transporte de resíduos	Escopo 3 (ou 1)	Fraco	Dependente das práticas adotadas na fase de demolição e logística contratada.
C3 – Tratamento de resíduos	Escopo 3	Fraco	A reciclabilidade é condicionada pelo projeto, mas o tratamento efetivo cabe a terceiros.
C4 – Disposição final	Escopo 3	Inexistente	Etapa fora do controle decisório do construtor.
D – Benefícios e cargas além do sistema	Escopo 3 (evitado)	Médio	O projeto pode viabilizar reciclagem e reaproveitamento, criando créditos, porém, além do controle do empreendedor.

Fonte: Autor (2026)

A análise, neste ponto, evolui para a necessidade de juntar-se a distribuição percentual anterior (Tabela 10) com classificação do grau de influência do construtor (Quadro 5). Na Figura 13, a seguir, é possível perceber, separadamente, que a soma das médias dos intervalos de percentuais adotados como referência para a classificação Fraco é igual 10% das emissões, que para a classificação Médio a soma é 84,5% e, finalmente, que a soma das classificações consideradas de Forte influência direta é de apenas 3% ao longo do CV. Vale destacar, porém, que a soma das classificações Médio e Forte representa 87,5%, valor bastante alto que indica a necessidade de concentração de esforços na adoção de medidas mitigadoras direcionadas a este conjunto de atividades, ainda que sejam de responsabilidade indireta pelo construtor, que pode, no entanto, interferir no projeto, por exemplo

Figura 13 - Grau de influência do construtor sobre decisões para mitigação de emissões de GEE



Fonte: Autor (2026)

6.5 - Pegada de carbono embutido em edificações – estimativa por unidade funcional (m^2)

Os estudos que abordam as emissões de GEE das edificações apresentam os dados de inventário em quantidade total por unidade, na unidade toneladas de CO_2 ou toneladas CO_2eq . No entanto, também é habitual a apresentação de resultados em massa desses gases por área construída, o que permite a realização de estudos comparativos entre edifícios de tipologias e características construtivas diferentes, utilizando-se a unidade funcional metro quadrado (tCO_2/m^2).

Assim, no presente trabalho, a busca por valores que indiquem as emissões de GEE de edifícios foi feita de duas maneiras: por meio de levantamento bibliográfico e com uso do programa computacional CasaCO (UFJF, 2017), utilizando os resultados de Castro et al. (2022) e Oliveira, P. L. (2022). Este programa foi desenvolvido no Departamento de Construção Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora em 2017 e vem sendo aprimorado desde então. Considera a fronteira ‘berço-portão’ e permite variações de tempo de vida útil, de soluções construtivas das etapas de construção Estrutura, Paredes (+ revestimentos), Cobertura, Pisos, Portas e Janelas, incluindo a contabilização das emissões de trocas de componentes construtivos ao longo do tempo.

A Tabela 11 traz o resumo do levantamento bibliográfico realizado pelo autor do presente trabalho para casos brasileiros. Nota-se que há valores até quatro vezes maiores entre os resultados dos edifícios de padrão Baixo, o mesmo ocorrendo para os de padrão Normal. Não foi encontrada diferença, entretanto, na comparação entre as médias desses dois conjuntos, de 0,19 tCO₂e/m². O único estudo levantado para padrão alto apresentou resultado superior a essas médias, de 0,22 tCO₂e/m². Há metodologias distintas de cálculo adotadas pelos diversos autores, que vão das fronteiras do estudo (berço-portão, berço-obra etc.) às bases de dados de fatores de emissão utilizadas.

Tabela 11 – Emissões de edificações por unidade funcional - levantamento bibliográfico

Autor(es)	Estado brasileiro	Porte	Padrão	Área construída (m²)	Inventário de CO₂e (t)	Emissões por unidade funcional (tCO₂e/m²)
Castro (2021)	MG	Residencial unifamiliar	Baixo	58,64	7,62	0,13
Kozloski; Vaghetti; Silva (2019)	RS	Residencial unifamiliar	Baixo	55,42	12,74	0,23
Kozloski; Vaghetti; Silva (2019)	RS	Residencial unifamiliar	Baixo	55,42	14,22	0,26
Cunha (2016)	RS	Residencial unifamiliar	Baixo	42,89	3,01	0,07
Costa (2012)	RJ	Residencial unifamiliar	Baixo	42,00	8,33	0,19
Stachera (2008)	PR	Residencial unifamiliar	Baixo	40,00	8,96	0,22
Média padrão Baixo						0,19
Castro (2021)	MG	Residencial unifamiliar	Normal	106,44	14,90	0,14
Lima (2018)	RN	Residencial unifamiliar	Normal	80,00	18,79	0,23
Rosa (2018)	PR	Residencial unifamiliar	Normal	119,19	47,42	0,36
Santos et al. (2016)	PE	Residencial unifamiliar	Normal	80,00	15,72	0,19
Silva et al. (2024)	PE	Prédio Popular	Normal	1.194,93	243,68	0,21
Autor (2025)	MG	Prédio Popular	Normal	821,80	148,05	0,18
Oliveira (2023)	RE	Prédios multifamiliares	Normal	253.015,80	53.133,32	0,21
Castro (2021)	MG	Prédio Popular	Normal	2.590,35	310,84	0,12
Maciel (2016)	PR	Prédio Comercial	Normal	10.987,00	907,04	0,08
Média padrão Normal						0,19
Silva et al. (2023)	BA	Prédio multifamiliar	Alto	5.066,50	1.134,70	0,22
MÉDIA TOTAL						0,19

Fonte: Autor (2026)

Oliveira, P. L. (2022) estimou as faixas de emissão de CO₂ por metro quadrado a partir de simulações realizadas com a planilha CasaCO, fixando inicialmente a área construída em 100 m² e variando o padrão construtivo (baixo, médio e alto). Para cada

padrão foram combinadas diferentes soluções construtivas usuais do mercado (paredes, pisos, coberturas, portas e janelas), com base em fatores de CO₂ embutido dos materiais. A partir dos resultados obtidos, foram definidos valores-limite de CO₂ embutido (tCO₂/m²) representativos de cada padrão construtivo:

- Padrão construtivo baixo: 0,126 tCO₂/m²
- Padrão construtivo normal: 0,174 tCO₂/m²
- Padrão construtivo alto: 0,260 tCO₂/m²

Castro et al. (2022) utilizaram o mesmo programa computacional, porém variando tipologias normativas de porte e padrão definidos pela norma ABNT NBR 12.721 (ABNT, 2021), obtendo os seguintes resultados:

- Padrão construtivo baixo: aproximadamente 0,110 a 0,130 tCO₂/m²
- Padrão construtivo normal: aproximadamente 0,110 a 0,140 tCO₂/m²
- Padrão construtivo alto: aproximadamente 0,130 a 0,140 tCO₂/m²

Os resultados obtidos por Castro et al. (2022) indicam que as emissões de CO₂ embutido por metro quadrado em edificações residenciais apresentam variação relativamente limitada, situando-se, de modo geral, entre aproximadamente 0,110 e 0,140 tCO₂/m², mesmo quando considerados diferentes portes de edificações e padrões de acabamento. Oliveira, P. L. (2022), no entanto, que considera alternativas concretas de soluções construtivas nos cálculos (paredes, pisos, coberturas, esquadrias), encontrou valores-limite mais espaçados, ligadas às escolhas do projeto.

O presente trabalho não tem como objetivo estabelecer o valor ou faixas de valores que serviriam de base para um modelo de cobrança de impostos sobre emissões de GEE. Entende-se que há necessidade de evoluir em diversos pontos cruciais que seriam a base para esta definição, negociados entre os diversos agentes da cadeia da construção civil, como: tipologias construtivas representativas do mercado (se aquelas da norma ABNT NBR 12.721, se definidas por região do país etc.), quais seriam os fatores de emissão adotados para os cálculos (evolução do SIDAC, base organizada pela indústria, organismos certificadores), abrangência dos dados quanto às fases do CV (berço-portão, berço-obra etc.).

6.6 - Vantagens e desvantagens dos modelos de mitigação abordados

Cada modelo de mitigação de impactos ambientais pode ser mais ou menos vantajoso de acordo com circunstâncias que envolvem cenários econômicos, culturais,

tecnológicos e setoriais. A indústria da construção civil, particularmente o setor de edificações, tende a ser conservadora no aspecto cultural, ou seja, de fraco engajamento para questões ambientais, mas pode assumir posição de vanguarda em se tratando de tecnologia. A seguir são levantados alguns aspectos dos modelos abordados.

A compensação ambiental, realizada por meio da aquisição de créditos de carbono ou do apoio a projetos de sequestro de CO₂ — como reflorestamento ou geração de energia renovável — pode ser um instrumento válido para neutralizar emissões residuais, entendidas como aquelas que permanecem após a adoção de todas as medidas de mitigação direta ao longo do ciclo de vida da edificação (World Green Building Council, 2019; RICS, 2023). No entanto, esse mecanismo não substitui a necessidade de reduzir as emissões associadas ao projeto arquitetônico, à escolha de materiais e aos processos construtivos, especialmente aquelas relacionadas ao carbono embutido nos materiais de construção (IPCC, 2022). Ainda, quando utilizada de forma isolada, a compensação ambiental pode gerar uma falsa percepção de sustentabilidade, ao permitir que um empreendimento seja considerado de baixo impacto sem que tenha ocorrido redução das emissões na origem.

Adotar soluções construtivas eficientes passa por conhecimento técnico específico para a finalidade de redução de emissões (BAIOCHI; SILVA, 2021). A redução das emissões a partir de telhados verdes, paredes isolantes, geração de energia etc. oferece, como vantagem, resultados de longa duração na etapa de uso da edificação (UNEP, 2023). Entretanto, antes de optar por qualquer solução, é preciso avaliar as condições locais, a fim de se elaborar propostas arquitetônica e de engenharia adequadas. Um projeto arquitetônico bem elaborado pode prever soluções condizentes com a realidade bioclimática de cada região, não apenas baseadas nas características dos materiais e suas propriedades térmicas (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2022).

A tributação de materiais ou processos altamente intensivos em carbono pode criar incentivos econômicos para substituição por alternativas mais limpas. No entanto, sua efetividade depende de forte base regulatória, critérios transparentes na contabilização de emissões e mecanismos de fiscalização/verificação de conformidades, tanto de projetos quanto de obras. O comércio de emissões (créditos) pode ser eficiente em ambientes em grandes volumes de transações, mas sua aplicação no setor da construção tende a esbarrar em barreiras operacionais e de mensuração das quantidades de carbono envolvidas,

especialmente em um setor que se caracteriza por parcela expressiva de projetos de menor porte.

A Tabela 12 reúne as principais vantagens e desvantagens de cada mecanismo, assim como apresenta exemplos práticos para cada um deles.

Tabela 12 - Vantagens e desvantagens dos modelos de mitigação de emissões de GEE

Mecanismo	Vantagens	Desvantagens	Exemplos práticos
Compensação ambiental	Neutraliza emissões residuais. Exigência legal ou voluntária.	Pode desestimular mitigação direta. Não-garantia de aplicação dos recursos. Exige critérios rigorosos de certificação e monitoramento.	Compra de créditos de carbono de projetos de reflorestamento ou energia renovável; investimento em usinas de biogás para compensar emissões da fase de construção.
Soluções construtivas eficientes	Redução direta das emissões na origem. Redução de custos operacionais ao longo da vida útil.	Custo inicial maior. Exige capacitação técnica especializada.	Uso de concreto com baixo teor de clínquer; aço reciclado; sistemas construtivos industrializados.
Imposto ambiental	Estimula financeiramente a redução de emissões. Pode gerar recursos para políticas ambientais.	Pode ser impopular. Requer base legal clara e fiscalização eficaz.	Cobrança de taxa por tonelada de CO ₂ emitida.
Comércio de emissões	Incentivo econômico à eficiência.	Complexidade de implementação.	Construtora adquire créditos de outra empresa com emissões inferiores.

Fonte: Autor (2026)

6.7 - Sugestão de mecanismo de mitigação/compensação

A responsabilização do empreendedor pela poluição de edificações passa por argumentos que vão de aceitáveis a controversos.

Entre aqueles que podem ser considerados aceitáveis está o inquestionável quadro atual de mudanças climáticas, cujo agravamento se dá, em boa parte, pelas atividades do setor de construção civil, como já explorado no presente trabalho. Aguardar indefinidamente que o setor empresarial, tradicionalmente conservador, tome consciência do problema e, por si mesmo, adote políticas de redução da poluição, não parece sensato. A posição adotada nas discussões da presente dissertação é a de que não se pode esperar, incorporando o espírito e metas de acordo internacionais. É necessário, portanto, identificar quais são os pontos principais que, no curto e médio prazo, seriam alcançáveis e de ação direta do agente com mais poder de conduzir mudanças na cadeia produtiva das edificações – o próprio empreendedor.

Como pontos controversos, podem ser citados: a) risco de bitributação, na medida em que a cadeia produtiva já é tributada a montante do processo de construção; b) reação do setor, no sentido de repassar eventuais novos custos ao consumidor e encarecer os produtos; c) falta de dados consistentes para adoção como marcos de emissão de CO₂; d) Falta de preparação técnica dos agentes responsáveis pela implementação e cobrança do modelo no mercado.

Ao contemplar o que se apresentou como desvantagens no tópico anterior, o cenário é desafiador. No entanto, várias leis do cotidiano da sociedade surgiram diante do que parecia impossível, como obrigar motoristas a usar o cinto de segurança (1997) ou proibir o ato de fumar (2011) em recintos coletivos fechados, lembrando que era natural o ato de fumar durante uma visita na casa de um parente e dentro dos ônibus.

O mecanismo a seguir proposto não é considerado de fácil aceitação ou implantação, perante possíveis reações diversas e dificuldades metodológicas. Mais uma vez, vale citar um exemplo de cenário inicialmente complexo ao se lançar uma nova lei ou norma: a norma técnica brasileira de desempenho de edificações – ABNT NBR 15575 – teve a entrada em vigor de sua primeira edição em 2008, após anos de elaboração, já com a introdução dos conceitos de desempenhos mínimo, intermediário e superior e de vida útil de projeto (VUP). Houve resistência do setor imobiliário – custos, riscos jurídicos, responsabilização excessiva do construtor etc. - até a revisão do texto para uma

segundo edição em 2013, em vigor atualmente, com emendas em 2015, em resposta às dificuldades de aplicação prática identificadas pelo setor da construção.

As regulamentações térmicas francesas, as chamadas RTs, por exemplo, são inspiradoras ao estabelecer um valor máximo de gasto de energia por novas edificações, por região bioclimática da França. Exemplo: para uma região do sul do país, o consumo máximo é de 50 kwh/m².ano, valor que deverá ser verificado em uma simulação computacional por modelo matemático acreditado pelo governo. A licença para construir depende de um atestado emitido por escritório credenciado especializado, com declaração de valores de consumo de energia da edificação na fase de uso.

A ideia de modelo sugerida a seguir procura “contemplar” os modelos apresentados anteriormente (capítulo 4), conjugando-os e convergindo-os para um mecanismo que passa por mais de uma opção. No Quadro 6 sistematizam-se os elementos estruturantes do mecanismo e na Figura 14 é ilustrada, por meio de um fluxograma, a lógica de funcionamento.

Quadro 6 - Elementos estruturantes do modelo de tributação

Elemento	Definição
Unidade funcional	m ² de área construída
Indicador ambiental	kgCO ₂ e/m ²
Base normativa	EN 15978 + GHG Protocol + Selo Azul
Agente da cadeia de construção	Construtor / empreendedor
Fato gerador	Emissões acima de faixa ou valor estabelecido
Fatores mitigadores	Critérios baseados em certificações

Fonte: Autor (2026)

Principais premissas para o desenvolvimento do modelo sugerido:

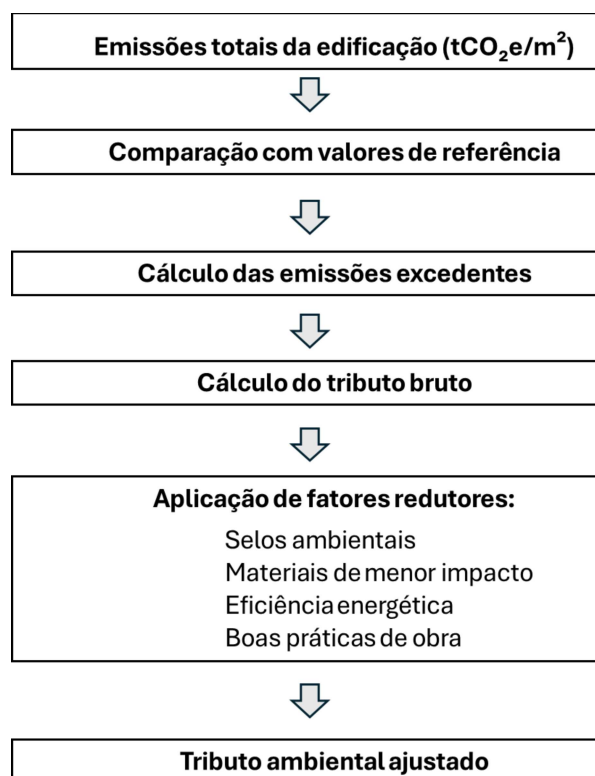
- 1) **A base para o cálculo do imposto é o carbono incorporado nos materiais de construção.** Justificativas: a) a escolha dos materiais é de forte influência do construtor; b) o impacto do carbono incorporado tende a ser cada vez mais importante ao longo do ciclo de vida futuramente, em relação a outras fases do CV, como explicitado anteriormente (item 3.2.2 - Emissões das edificações e o fator tempo); c) o carbono de outras fases

do CV, como o fase de uso, embora importante, depende de simulações ainda mais complexas do comportamento futuro das edificações.

- 2) Evitar bitributação – emissões de Escopo 3 podem já ter sido tributadas a montante na cadeia, com cobrança de impostos dos grandes fabricantes (cimento, cerâmica, vidro etc.). As especificações de materiais na busca de redução de CO₂ incorporado, isto é, gestão de emissões, deverão ser acompanhadas de técnicas racionais que reduzam, ao mesmo tempo, emissões de Escopos 1 e 2.
- 3) **O imposto não será zerado, mesmo aplicando-se fatores redutores, a não ser em faixas de isenção.** Justificativa: a atividade de construção deve pagar (financeiramente ou no sentido de penitência) pelos seus impactos ambientais, maiores ou menores que sejam. A ideia vem da lógica da cobrança de impostos sobre a renda, sobre produtos industrializados etc.

Fluxograma sugerido (Figura 14):

Figura 14 – Fluxograma do mecanismo de mitigação sugerido



Fonte: Autor (2026)

Emissões totais da edificação por unidade funcional ($\text{tCO}_2\text{e}/\text{m}^2$)

1º passo: Calcular a quantidade total de CO_2 incorporado dos materiais da edificação, que é a soma das quantidades de todos os materiais da construção, em massa, multiplicadas pelos seus respectivos fatores de emissão.

2º passo: Dividir o resultado do passo anterior pela área total construída (m^2), para obtenção da emissão por unidade funcional (tCO_2/m^2).

Comparação com valores de referência

O valor de emissão por unidade funcional, em tCO_2/m^2 , obtido na etapa anterior, deve ser comparado com valores de referência – por região, por padrão construtivo ou outra classe a ser estudada.

Cálculo do tributo bruto

Se a emissão por área construída ultrapassar o(s) valor(es) de referência, calcula-se o tributo bruto através da seguinte multiplicação em duas etapas: a) valor excedente (valor da construção menos o valor de referência), em tCO_2/m^2 , pela área construída; b) valor obtido, em toneladas, pelo preço da tonelada de carbono estabelecida pelo mercado de créditos de carbono (fonte definidora do preço a ser acordada). At

Atenção neste ponto: mensurar, por percentuais a serem definidos, aquelas emissões relacionadas aos Escopos 1 e 2, de controle direto do construtor, e ao Escopo 3, eventualmente já tributados a montante.

Aplicação de fatores redutores

Caso o empreendimento adote, ainda na etapa de projeto, medidas mitigadoras comprovadas de emissões de GEE, é aplicado um fator de redução de valor menor do que 1,0 sobre o valor do tributo bruto.

Este ponto é aquele que pode ser considerado agregador de mais de um modelo de mitigação ambiental. Descontos, fatores de redução, níveis de desempenho etc. e outros mecanismos de bonificação são praxe na economia e em sistemas de classificação (superior, intermediário, mínimo). Funcionam como estímulo, por exemplo, ao pagamento antecipado e à busca de melhorias em processos produtivos.

Tributo ambiental ajustado

Finalmente, multiplicando-se um ou mais fatores de redução pelo valor do tributo bruto, obtém-se o valor do tributo ambiental ajustado.

O Quadro 7 descreve o modelo em equações matemáticas, correlacionando-as com as caixas do fluxograma da Figura 14.

Quadro 7 – Descrição do modelo de mitigação e emissões de GEE

Caixa do fluxograma	Formulação matemática
Emissões totais da edificação por unidade funcional	$E_{mat} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot FE_i$
Emissões totais da edificação por unidade (tCO ₂ e/m ²)	$e = \frac{E_{mat}}{A}$
Comparação com valores de referência	$E^+ = \begin{cases} 0 \\ (e - R) \cdot A, se e > R \end{cases}$
Cálculo do tributo bruto	$T_{bruto} = p \cdot E^+$
Aplicação de fatores redutores	$T_{aj} = T_{bruto} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot \dots \cdot f_k, \text{ com } 0 < f_k \leq 1$
Tributo ambiental ajustado	$T_{final} = T_{aj}$ (ou conforme a regra de isenção definida)
Tributo ambiental ajustado	$T_{final} = T_{aj}$

Fonte: Autor (2026)

Definição das variáveis e parâmetros do Quadro 7:

- $i = 1, \dots, n$: índice dos materiais empregados na edificação
- m_i : massa do material i [kg]
- FE_i : fator de emissão do material i [tCO₂e/kg]
- E_{mat} : emissões totais de CO₂e incorporadas nos materiais da edificação [tCO₂e]
- A : área construída da edificação [m²]
- e : emissão específica por unidade funcional [tCO₂e/m²]
- R : valor de referência de emissões por área construída [tCO₂e/m²]

- E^+ : emissões excedentes totais em relação ao valor de referência [tCO_2e]
- p : preço unitário do carbono [$\text{R\$/tCO}_2\text{e}$]
- T_{bruto} : valor do tributo ambiental bruto [$\text{R\$}$]
- $k = 1, \dots, K$: índice das ações mitigadoras adotadas
- f_k : fator redutor associado à ação mitigadora k (adimensional)
- T_{aj} : valor do tributo ambiental ajustado [$\text{R\$}$]

Podem ser considerados pontos técnicos desafiadores do modelo:

- a) **Fatores de emissão dos materiais:** a definição da quantidade de CO_2 incorporado do aço, do vidro, do cimento etc. por unidade de massa ou volume do material (kgCO_2/kg ou kgCO_2/m^3) deverá pertencer a uma base de dados sólida e acordada entre os agentes da cadeia de construção;
- b) **Definição dos valores de emissão de referência;**
- c) **Fatores redutores:** Em primeiro lugar, a definição do valor do fator para cada ação mitigadora: 0,90, 0,85, 0,80... A redução deverá estar relacionada à emissão evitada com a adoção de medida mitigadora ou compensadora. Exemplo: uma determinada área plantada corresponde à captura de quantas toneladas de CO_2 ? A instalação de aquecedor solar de água corresponde à economia de qual quantidade de energia e, por conseguinte, à qual quantidade de CO_2 emitida evitada?

O fator 0,9, por exemplo, que reduz o total de CO_2 da edificação para a tributação em 10%, deverá, ao ser aplicado, resultar em uma quantidade de carbono evitado, capturado ou compensado igual àquela resultante da solução construtiva, escolha de material ou outra ação mitigadora adotada.

Em síntese, o modelo proposto constitui um mecanismo, ainda que em estágio conceitual, de responsabilização ambiental associado às emissões de gases de efeito estufa na construção de edificações, baseado no carbono incorporado dos materiais e na capacidade de decisão do construtor. Funciona com valores de referência comparativos e com fatores redutores relacionados a ações mitigadoras, buscando ser compatível com a realidade do setor da construção civil brasileira. Com a proposta, espera-se subsidiar a formulação de políticas públicas voltadas a mitigação de emissões.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho analisou as emissões de gases de efeito estufa associadas às edificações no contexto brasileiro, com ênfase no dióxido de carbono, a partir de uma abordagem baseada no ciclo de vida e na classificação por escopos do GHG Protocol. A aplicação da Análise de Ciclo de Vida demonstrou que uma parcela significativa das emissões ocorre antes da fase de uso das edificações, sobretudo na produção de materiais e na construção, evidenciando a importância do carbono embutido no cenário de emissões nacionais do setor. Esta distribuição ocorre especialmente em função da matriz elétrica brasileira, de menor intensidade de carbono em relação a países mais industrializados, cujas matrizes se baseiam primordialmente em combustíveis fósseis.

Contudo, a ênfase nas emissões incorporadas não exime a relevância das emissões operacionais. Sob uma perspectiva sistêmica, materiais com baixo carbono embutido podem apresentar desempenho térmico inferior, o que resultaria em um aumento do consumo energético para aquecimento ou resfriamento artificial ao longo da vida útil da edificação. Portanto, evidencia-se a necessidade de estudos futuros que abordem ambas as temáticas de forma integrada, visando a otimização do desempenho ambiental global do ciclo de vida das construções.

A consolidação de resultados quantitativos expressos em kgCO₂e por metro quadrado permitiu sugerir faixas típicas de emissões ao longo do ciclo de vida das edificações, fornecendo base para a definição de valores de referência. Esses resultados mostram que as emissões associadas às edificações podem justificar sua incorporação em mecanismos de responsabilização ambiental no setor da construção.

A classificação das emissões segundo os escopos do GHG Protocol evidenciou a predominância do Escopo 3. Entretanto, os resultados deste trabalho deixam claro que essa classificação não isenta o construtor e o empreendedor de responsabilidade. Pelo contrário, as principais fontes de emissão associadas às edificações são diretamente associadas a decisões técnicas tomadas por esses agentes, incluindo a especificação de materiais, a definição de sistemas construtivos, a escolha de fornecedores, a organização do canteiro de obras e as soluções de projeto que condicionam o desempenho ambiental futuro do edifício. Portanto, ainda que classificadas como emissões indiretas, essas emissões são produzidas por decisões sob controle decisório dos responsáveis pelo

empreendimento. Trata-se, portanto, de responsabilização pelas emissões de CO₂ associadas às edificações.

Com base nesse entendimento, o modelo conceitual desenvolvido propõe a eventual cobrança de um imposto ambiental incidente sobre as emissões excedentes por metro quadrado. A possibilidade de redução de valores por meio da adoção de soluções mitigadoras não elimina a responsabilização, mas induz a escolhas técnicas menos emissoras.

Do ponto de vista do mercado da construção, a resistência a esse tipo de mecanismo é previsível, mas o modelo proposto contempla diferenciação entre empreendimento. A utilização de selos ambientais, em especial o Selo Azul da CAIXA, como referência para a aplicação de fatores redutores, transfere ao construtor a decisão estratégica de melhorar o desempenho ambiental de seus produtos.

Quanto aos ganhos ambientais, o modelo proposto apresenta potencial de redução das emissões de CO₂ justamente por incidir sobre a origem das emissões. Ao atuar diretamente sobre decisões de projeto, seleção de materiais e execução da obra — decisões controladas pelo construtor — o instrumento privilegia a redução do carbono embutido, principal componente das emissões no contexto brasileiro. Trata-se, portanto, de um mecanismo com capacidade de gerar benefícios ambientais efetivos.

As limitações do estudo estão relacionadas ao uso de dados secundários e à ausência de aplicação empírica do modelo. Ainda assim, o trabalho estabelece que a descarbonização do setor da construção exige a atribuição direta de responsabilidade ao construtor e ao empreendedor, inclusive por meio de instrumentos econômicos. Pesquisas futuras devem avançar na aplicação prática desse modelo, especialmente na melhor definição dos valores de referência por tipologia construtiva e dos fatores de redução que levem a ganhos ambientais de valores correspondentes.

REFERÊNCIAS

- ABREU, Nathalia de Lavor; RIBEIRO JUNIOR, Gabriel de Oliveira; PIMENTA FILHO, Edgard Cavalcanti; OLIVEIRA, Chiara Albano de Araujo. Mudanças de uso da terra e emissão de gases de efeito estufa: uma explanação sobre os principais drivers de emissão. **Ciência Animal Brasileira**, Goiânia, v. 25, e-77646E, 2024. DOI: 10.1590/1809-6891v25e-77646E. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/vet/article/view/77646>. Acesso em: 28 jun. 2025.
- ALENCAR, Samira Gomes; ROCHA, Alisson de Sousa; SILVA, Leonardo Barboza da; ANDRADE, João Maria de. Emissões de CO₂ de edificações no Brasil: uma revisão sistemática sobre o ciclo de vida. **Cadernos de Prospecção**, Salvador, v. 19, n. 1, p. 145–158, jan./mar. 2026. Disponível em: <https://www.periodicos.ufba.br/index.php/nit/article/download/60839/39732/282128>. Acesso em: 25 jan. 2026.
- ARENE (AGENCE RÉGIONALE DE L'ÉNERGIE ET DE L'ENVIRONNEMENT). **Guide Bio-tech**: l'énergie grise des matériaux et des ouvrages. Paris: ICEB, 2012. Disponível em: https://www.asso-iceb.org/wp-content/uploads/2012/11/guide_bio_tech_1_energie_grise_des_materiaux_et_des_ouvrages.pdf. Acesso em: 27 jan. 2026.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040**: Emenda 1 – Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: 2025. 21p
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14067**: Gases de efeito estufa - Pegada de carbono de produtos - Requisitos e orientações sobre quantificação. Rio de Janeiro: 2023. 54p
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14064-1**: Gases de efeito estufa Parte 1: Especificação com orientação no nível da organização para quantificação e notificação de emissões e remoções de gases de efeito estufa. Rio de Janeiro: 2022. 63p
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12721**: avaliação de custos unitários de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edifícios – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575**: Edificações Habitacionais–Desempenho. Rio de Janeiro: 2013.
- AYOADE, Johnson Olaniyi. **Introdução à Climatologia para os Trópicos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996.
- AZEVEDO, Ana Lucia. Mas, afinal, o que é o mercado de crédito de carbono? **O Globo**, Rio de Janeiro, 14 nov. 2024. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/economia/especial/o-que-e-o-mercado-de-carbono-entenda-no-especial-que-explica-a-regulacao-aprovada-no-senado.ghtml>. Acesso em: 21 dez. 2024.
- BAIOCHI, A. G.; SILVA, V. G. da. **Análise de incerteza de parâmetros com base em processos críticos em avaliação do ciclo de vida de edificações**. PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção, Campinas, SP, v. 12, p. e021027, 2021.

BARBIERI, J. C. Assuntos ambientais polêmicos e o princípio da precaução: discutindo o aquecimento global em sala de aula. **Administração: Ensino e Pesquisa**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 3, p. 519-556, jul./set. 2013. DOI: 10.13058/raep.2013. v14n3.60.

BEMFICA, José Maurício do Couto. **Construção de casas: sustentabilidade na construção civil**. 2015. 103 f. Dissertação (Mestrado em Administração) – Faculdade de Ciências Empresariais, Universidade FUMEC, Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <https://repositorio.fumec.br/handle/123456789/372>. Acesso em: 16 jan. 2026.

BRASIL. Comissão de Gestão de Eficiência Energética (CGIEE). **Resolução CGIEE nº 4, de 26 de setembro de 2025**. [Ementa ou descrição curta do objetivo da resolução, se houver]. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2025a. Disponível em: https://www.reddit.com/r/browsers/comments/1ced3y6/is_there_any_way_to_see_what_resolution_and/?tl=pt-br. Acesso em: 21 fev. 2026.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2025: relatório síntese: ano base 2024**. Brasília: EPE, 2025. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-767/BEN_S%C3%ADntese_2025_PT.pdf. Acesso em: 27 jan. 2026.

BRASIL. [Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024]. **Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE)**. Brasília: Presidência da República, 2024a. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2024/lei-15042-11-dezembro-2024-796690-publicacaooriginal-173745-pl.html>. Acesso em: 21 fev. 2026.

BRASIL. Caixa Econômica Federal. **Selo Casa Azul + CAIXA**. Brasília: CAIXA, 2024b. Disponível em: <https://www.caixa.gov.br/sustentabilidade/negocios-sustentaveis/selo-casa-azul-caixa/Paginas/default.aspx>. Acesso em: 21 fev. 2026.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Cotas de Reserva Ambiental (CRA)**. Brasília: MMA, 2024c. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br>. Acesso em: 21 fev. 2026.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **SIDAC: Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção**. Brasília: MME, 2025b. Disponível em: <https://sidac.org.br/busca>. Acesso em: 11 ago. 2025.

BRASIL. Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). **Portal de Periódicos da CAPES**. Brasília: CAPES, 2024. Disponível em: <https://www.periodicos.capes.gov.br>. Acesso em: 1 abr. 2024.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro). **Portaria nº 309, de 12 de julho de 2021**. [Estabelece os Requisitos Consolidados para o Nível de Eficiência Energética de Edificações]. Brasília, DF: Inmetro, 2021a. Disponível em: <http://sistema-sil.inmetro.gov.br/rtac/RTAC002989.pdf>. Acesso em: 21 fev. 2023.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro). **Portaria nº 42, de 24 de fevereiro de 2021**. [Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C)].

Brasília, DF: Inmetro, 2021b. Disponível em: <http://sistema-sil.inmetro.gov.br/rtac/RTAC002693.pdf>. Acesso em: 21 fev. 2023.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 6. ed. Brasília, DF: MCTI, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee/arquivos/6a-ed-estimativas-anuais.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2025.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Novo Caged**: outubro. Brasília, DF: MTE, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/estatisticas-trabalho/novo-caged/novo-caged-2024/outubro>. Acesso em: 1 dez. 2024.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **SIRENE**: Sistema de Registro Nacional de Emissões. Brasília: MCTI, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/paginas/sistema-de-registro-nacional-de-emissoes-sirene>. Acesso em: 21 fev. 2026.

BRASIL. [Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012]. **Institui o novo Código Florestal Brasileiro**. Brasília: Presidência da República, 2012.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. **Certificação verde agrega valor à obra e é diferencial na comercialização**. Brasília: CBIC, 2024. Disponível em: <https://cbic.org.br/enic/96/2024/04/04/certificacao-verde-agrega-valor-a-obra-e-e-diferencial-na-comercializacao/>. Acesso em: 8 fev. 2025.

CASTRO, J. A.; GARCIA, D. R.; BASTOS, P. K. X. Estudo da influência do porte e do padrão de acabamento na quantidade de CO₂ embutido em edifícios residenciais. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE SUSTENTABILIDADE URBANA, 2., 2022, Vitória. **Anais** [...]. Vitória: UFES, 2022. p. 827-836.

CENTRO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. **O Programa**. Rio de Janeiro: Procel Info, 2014. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?Team=%7B505FF883%2DA273%2D4C47%2DA1E%2D0055586F97FC%7D>. Acesso em: 8 jul. 2025.

CIRCULAR ECOLOGY. **ICE Database**: The Inventory of Carbon and Energy. Bath: University of Bath/Circular Ecology, 2024. Disponível em: <https://circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html>. Acesso em: 21 fev. 2026.

COSTA, B. L. C. **Quantificação das emissões de CO₂ geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil**. 2012. 208 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

COSTA, Regina Pacca. **Ciências do ambiente**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2021. 1 recurso online. ISBN 978-65-86235-42-5.

CUNHA, Iasminy Borba da. **Quantificação das emissões de CO₂ na construção de unidades habitacionais residenciais unifamiliares com diferentes materiais**. 2016. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) – Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

D'AMICO, B.; POMPONI, F. Net zero in buildings and construction: use and misuse of carbon offsets. In: POMPONI, F.; DE WOLF, C.; MONCASTER, A. (org.). **The**

Routledge Handbook of Embodied Carbon in the Built Environment. [S. l.]: Routledge, 2023. p. 41-49. DOI: 10.4324/9781003277927-5. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9781003277927-5/>. Acesso em: 27 jan. 2026.

DA SILVEIRA CACHOLA, C.; PEYERL, D. Pegada de carbono na construção civil brasileira: uma comparação com as principais economias globais. **Encontro Latino-Americano e Europeu sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis (euroELECS)**, [S. l.], v. 6, n. 1, p. 1–11, 2025. DOI: 10.46421/euroelecs.v6.7590. Disponível em: <https://doi.org/10.46421/euroelecs.v6.7590>. Acesso em: 27 jan. 2026.

DE WILDE, Pieter. The gap between predicted and measured energy performance of buildings: a framework for investigation. **Automation in Construction**, [S. l.], v. 41, p. 40-49, May 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092658051400034X>. Acesso em: 12 jan. 2026.

ECOSYSTEM MARKETPLACE. **The Art of Integrity: State of the Voluntary Carbon Markets 2022 Q3.** Washington, DC: Forest Trends, 2022. Disponível em: <https://www.ecosystemmarketplace.com/publications/state-of-the-voluntary-carbon-markets-2022/>. Acesso em: 27 jan. 2026.

ECOSYSTEM MARKETPLACE. **State of the Voluntary Carbon Markets 2022.** Washington, DC: Ecosystem Marketplace, 2022. Disponível em: <https://www.ecosystemmarketplace.com/publications/state-of-the-voluntary-carbon-markets-2022/>. Acesso em: 1 abr. 2024.

ECOINVENT ASSOCIATION. **Ecoinvent Database.** Zurich: Ecoinvent, 2024. Disponível em: <https://ecoinvent.org/database/>. Acesso em: 21 fev. 2026.

EVANGELISTA, Paula; SILVA, Maristela Gomes da; SAVASTANO JUNIOR, Holmer; GOMES, Vanessa. Environmental performance analysis of residential buildings in Brazil using life cycle assessment (LCA). **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 169, p. 748-761, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.045. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.045>. Acesso em: 27 jan. 2026.

EVANGELISTA, P.; TORRES, E.; GONÇALVES, J. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) como ferramenta de análise do desempenho ambiental de edificações. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2016. p. 1910-1920.

FORSTER, Piers; STORELVMO, Trude; ARMOUR, Kyle; COLLINS, William; DUFRESNE, Jean-Louis; FRAME, David; LUNT, Daniel J.; MAURITSEN, Thorsten; PALMER, Matthew D.; WATANABE, Masahiro; WILD, Martin; ZHANG, Xuebin. The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. In: MASSON-DELMOTTE, Valérie; ZHAI, Panmao; PIRANI, Anna; CONNORS, Sarah L.; PÉAN, Clotilde; BERGER, Sophie; CAUD, Nada; CHEN, Yang; GOLDFARB, Leah; GOMIS, Melissa I.; HUANG, Mengtian; LEITZEL, Katherine; LONNOY, Elizabeth; MATTHEWS, J. B. Robin; MAYCOCK, Thomas K.; WATERFIELD, Tressa; YELEKÇİ, Ozge; YU, Rong; ZHOU, Bin (ed.). **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge: Cambridge University Press, 2021. cap. 7, p. 923–1054. DOI: 10.1017/9781009157896.009.

FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS. **Programa Brasileiro GHG Protocol**. São Paulo: FGV, 2025. Disponível em: <https://repositorio.fgv.br/items/f6ce0440-782f-4cb0-9055-4fd963e7d9ad>. Acesso em: 8 fev. 2025.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS. **Registro Público de Emissões**. São Paulo: FGV, 2024a. Disponível em: <https://registropublicodeemissoes.fgv.br/>. Acesso em: 21 fev. 2026.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS. Centro de Estudos em Sustentabilidade (GVces). **Programa Brasileiro GHG Protocol**. São Paulo: FGV EAESP, 2024b. Disponível em: <https://eaesp.fgv.br/centros/centro-estudos-sustentabilidade/projetos/programa-brasileiro-ghg-protocol>. Acesso em: 21 fev. 2026.

FUNDAÇÃO VANZOLINI. **Certificação AQUA-HQE: alta qualidade ambiental**. São Paulo: Vanzolini, 2024. Disponível em: <https://vanzolini.org.br/organizacoes/certificacoes/aqua-hqe/>. Acesso em: 21 fev. 2026.

GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. **Edifício ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 591 p.

GBC BRASIL. Grgbceen Building Council Brasil. **Certificação LEED**. São Paulo: GBC Brasil, 2024. Disponível em: <https://www.gbcbrazil.org.br/certificacao/certificacao-leed/>. Acesso em: 21 fev. 2026.

GREENHOUSE GAS PROTOCOL. **Página inicial**. [S. l.]: GHG Protocol, 2026. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/>. Acesso em: 14 jan. 2026.

HOXHA, Endrit; BIRGISDOTTIR, Harpa; RÖCK, Martin. Climate IMPACT of EU building materials: data compilation and statistical analysis of global warming potential in environmental product declarations. **Sustainable Production and Consumption**, [s. l.], v. 54, p. 64-74, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.12.015>. Acesso em: 27 jan. 2026.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. **Compensação ambiental**. Brasília, DF: ICMBio, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/compensacao-ambiental>. Acesso em: 1 fev. 2025.

INIES. **Les données environnementales et sanitaires de référence pour le bâtiment**: base de données nationale de référence sur les caractéristiques environnementales et sanitaires des produits de construction e équipements. [França]: INIES, 2024. Disponível em: <https://www.base-inies.fr/consultation/tableau-de-bord>. Acesso em: 21 fev. 2026.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **SIDAC**: Sistema de Informação de Desempenho Ambiental da Construção: base de dados de materiais de construção. São Paulo: IPT, 2026. Disponível em: <https://sidac.org.br/>. Acesso em: 7 jan. 2026.

INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS (Minas Gerais). **Compensação ambiental**. Belo Horizonte: IEF, 2024. Disponível em: <https://www.ief.mg.gov.br/compensa%C3%A7%C3%A3o-ambiental>. Acesso em: 1 fev. 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**: Volume 1 – General Guidance and

Reporting. Geneva: IPCC, 2006. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>. Acesso em: 28 out. 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Buildings. In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change**. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2022. cap. 9, p. 953-1044. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>. Acesso em: 2 jan. 2026.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2013: the physical science basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [S. l.]: IPCC, 2013. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>. Acesso em: 22 dez. 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2023: Synthesis Report of the Sixth Assessment Report (AR6)**. Geneva: IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em: 27 jan. 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14025:2006: Environmental labels and declarations — Type III environmental declarations — Principles and procedures**. Geneva: ISO, 2006.

JUIZ DE FORA. [Prefeitura]. **Lei complementar nº 14.015, de 15 de fevereiro de 2020**. Dispõe sobre o Programa de Certificação Sustentável em Edificações no Município de Juiz de Fora, denominado JF IPTU VERDE e dá outras providências. Juiz de Fora: Câmara Municipal, 2020. Disponível em: <https://www.camarajf.mg.gov.br/sal/norma.php?njt=LEI&njn=14015&njc=>. Acesso em: 15 jun. 2024.

KABUNDU, Emmanuel. The 2019 carbon tax in South Africa: effects on relative cost of building materials, welfare, emissions, and energy consumption for households. **Acta Structilia**, [s. l.], v. 29, n. 2, p. 150-189, 2022. Disponível em: <https://journals.ufs.ac.za/index.php/as/article/view/6773/4591>. Acesso em: 17 ago. 2024.

KOZLOSKI, C. L.; VAGHETTI, M. A. O.; SILVA, B. N. Emissões de CO₂ na casa popular eficiente e o emprego de materiais alternativos. In: ENCUESTRO LATINOAMERICANO Y EUROPEO DE EDIFICACIONES Y COMUNIDADES SOSTENIBLES, 3., 2019, Santa Fe. **Anais [...]**. Santa Fe: Euro-ELECS, 2019.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES (LabEEE). **Relatório final: atualização dos requisitos de Eficiência Energética no Código de Obras de Salvador**. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2022. Coordenação: Roberto Lamberts.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: Eletrobras/Procel, 2022.

LIANG, Yumin; NG, S. Thomas; XUE, Fan; YAO, Jiahui. Decarbonization potentials of the embodied energy use and operational process in buildings: a review from the life-

cycle perspective. **Heliyon**, [S. l.], v. 9, n. 10, e20190, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20190>. Acesso em: 4 nov. 2025.

LIMA, E. M.; FERNANDES, R. T. V.; DANTAS, L. Quantificação de CO₂ emitido decorrente dos materiais empregados na construção de uma residência unifamiliar. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 2018, Maceió. **Anais [...]**. Brasília, DF: CONFEA, 2018. Disponível em: https://www.confea.org.br/sites/default/files/antigos/contecc2018/civil/171_qdceddmen cduru.pdf. Acesso em: 8 fev. 2025.

LOPES, Andréia Antonucci. **Construção sustentável**: medidas construtivas sustentáveis que buscam aumentar a eficiência no uso dos recursos e minimizar os impactos ao meio ambiente. 2013. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://dissertacoes.poli.ufrj.br/dissertacoes/dissertpoli659.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2026.

LUTGENS, Frederick K.; TARBUCK, Edward J.; HERMAN, Redina L. **The Atmosphere**: an introduction to meteorology. 14. ed. [S. l.]: Prentice Hall, 2018. Disponível em: <https://bpbuse1.wpmucdn.com/journeys.dartmouth.edu/dist/f/8272/files/2021/12/Meteorology-Textbookcompressed.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2026.

MACIEL, Marco Aurélio Diniz. **Levantamento de inventário de emissões de gases de efeito estufa em obra da indústria da construção civil em Maringá/PR**. 2016. 97 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Limpas) – Centro Universitário de Maringá, Maringá, 2016.

MARIN, Fábio Ricardo; ASSAD, Eduardo Delgado; PÍLAU, Felipe Gustavo. **Clima e ambiente**: introdução à climatologia para ciências ambientais. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2008.

MARUYAMA, Shigenori; SUGUIO, Kenitiro. **Aquecimento global?** São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

MATTOS, N. S.; GRANATO, S. F. **Terra em alerta**. 1. ed. São Paulo: Saraiva, 2010.

MEQUIGNON, Marc; ADRA, Haïfa; ADOLPHE, Luc; KUENTZ, André; DAGORNE, Virginie. Greenhouse gases and building lifetimes. **Building and Environment**, [S. l.], v. 68, p. 77-86, 2013.

MEQUIGNON, M. A. **Comment la durée de vie des bâtiments peut-elle influencer les performances en termes de développement soutenable?**. 2011. 324 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Université de Toulouse, Toulouse, 2011.

MOREIRA, Marcello Queiroz; CARDOSO, Pedro Fernandes Lima; ARANTES, Mariana Matos. Implantação de um plano de gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil. **JNT Facit Business and Technology Journal**, [s. l.], v. 1, n. 56, p. 291-309, nov. 2024. Disponível em: <http://revistas.faculdefacit.edu.br>. Acesso em: 27 jan. 2026.

MORETI, G. B.; TAMIOSSO, C. F.; TAMIOSSO, M. F.; SWAROWSKY, A. Legislação ambiental: revisão dos aspectos gerais da Política Nacional do Meio Ambiente. **Disciplinarum Scientia | Naturais e Tecnológicas**, Santa Maria, v. 18, n. 2, p. 253-264, 2017. Disponível em: <https://periodicos.ufn.edu.br/index.php/disciplinarumNT/article/view/2220>. Acesso em: 27 jan. 2026.

NAÇÕES UNIDAS. **Acordo de Paris**. Paris: ONU, 2015. Disponível em: https://treaties.un.org/pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-7-d&chapter=27&clang=_en. Acesso em: 29 dez. 2025.

ODUM, Eugene P.; BARRETT, Gary W. **Fundamentos de ecologia**. 5. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

OLIVEIRA, Paloma Lopes. **Emissão de CO₂ do setor de edificações**: análise de modelos de neutralização. 2022. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2022.

OLIVEIRA, Rafaela Maria Ferreira de. **Inventário de emissões de gases de efeito estufa**: Empresa Moura Dubeux Engenharia S/A. [S. l.]: Moura Dubeux, 2023. Disponível em: <https://registropublicodeemissoes.fgv.br/participantes>. Acesso em: 1 jan. 2026.

ONAT, Nuri Cihat; KÜÇÜKVAR, Murat; TATARI, Omer. Scope-based carbon footprint analysis of U.S. residential and commercial buildings: an input-output hybrid life cycle assessment approach. **Building and Environment**, [s. l.], v. 72, p. 53-62, 2014.

PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (PBMC). Informações paleoclimáticas brasileiras. In: AMBRIZZI, Teresinha; ARAUJO, Moacyr (org.). **Base científica das mudanças climáticas**: contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2014. cap. 4, p. 77-111. Disponível em:

https://www.pbmc.coppe.ufrj.br/documentos_publicos/GT1/GT1_volume_completo_ca_p4.pdf. Acesso em: 27 jan. 2026.

PANDEY, Divya; AGRAWAL, Madhoolika; PANDEY, Jai Shanker. Carbon footprint: current methods of estimation. **Environmental Monitoring and Assessment**, [S. l.], v. 178, n. 1-4, p. 135-160, 2011. DOI: 10.1007/s10661-010-1678-y. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-010-1678-y>. Acesso em: 27 jan. 2026.

PÖRTNER, Hans-Otto; ROBERTS, Debra C.; TIGNOR, Mike; POLOCZANSKA, Elvira S.; MINTENBECK, Katja; ALEGRÍA, Andrés; CRAIG, Marlies; LANGSDORF, Stefanie; LÖSCHKE, S.; V. MÖLLER, Vincent; OKEM, Andrew; RAMA, B. (ed.). **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. Disponível em: . Acesso em: 20 fev. 2026.

PNUMA. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. **2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector**. Nairobi: UNEP, 2022. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/41133>. Acesso em: 21 fev. 2026.

RÖCK, Martin; SAADE, Marcella Ruschi Mendes; BALOUKTSI, Maria; RASMUSSEN, Freja Nygaard; WALLBAUM, Holger; HABERT, Guillaume; PASSER, Alexander; STEPHAN, André; RASMUSSEN, Birgit; SILVA, Maristela Gomes da. Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation. **Applied Energy**, [S. l.], v. 258, 114107, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114107>. Acesso em: 27 jan. 2026.

RÖCK, Martin; BALOUKTSI, Maria; SAADE, Marcella Ruschi Mendes. Embodied carbon emissions of buildings and how to tame them. **One Earth**, [s. l.], v. 6, n. 11, p. 1442-1454, 17 nov. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.10.018>. Acesso em: 27 jan. 2026.

ROSA, Natália Panzeter Vieira. **Levantamento das emissões de gases de efeito estufa na construção de um condomínio residencial em série na cidade de Curitiba**. 2018. 77 f. Monografia (Especialização em Gestão Ambiental) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

ROTHSCHILD, D. **Manual Live Earth de sobrevivência ao aquecimento global: 77 táticas essenciais para frear as mudanças climáticas ou sobreviver a elas**. Barueri: Manole, 2007.

ROYAL INSTITUTION OF CHARTERED SURVEYORS. **Whole life carbon assessment for the built environment**. 2. ed. Londres: RICS, 2023. (RICS Professional Standard).

SAADE, Marcella Ruschi Mendes; GOMES, Vanessa; SILVA, Maristela Gomes da. Material eco-efficiency indicators for Brazilian buildings. **Smart and Sustainable Built Environment**, [S. l.], v. 3, n. 1, p. 54-71, 2014.

SANTOS, Fernanda Pasini dos et al. Quantificação das emissões de CO₂ dos materiais utilizados na construção de uma residência em Caçapava do Sul/RS. In: ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA AMBIENTAL, 14., 2016,

Brasília. **Anais [...]**. São Paulo: Blucher, 2016. p. 110-120. Disponível em: <https://pdf.blucher.com.br/engineeringproceedings/eneeamb2016/qa-007-4907.pdf>.

Acesso em: 9 fev. 2025.

SCHMIDT, M.; CRAWFORD, Robert H.; MYERS, Georgia Warren. Integrating life-cycle GHG emissions into a building's economic evaluation. **Buildings and Cities**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 361–378, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5334/bc.36>. Acesso em: 27 jan. 2026.

SCHUSTER, Bruna Smaniotto; TAMIOSSO, Maria Fernanda; TAMIOSSO, Cláudio Ferreira; SWAROWSKY, Adriano. Comparativo entre sistemas construtivos para a quantificação de emissão de CO₂. In: CONGRESSO SUL-AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE, 2., 2019, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: IBEAS, 2019. p. 1-10.

SILVA, Ângela Márcia de Andrade; ANDRADE, José Célio Silveira; BRITO, Isabelle Barbosa de. Inventário de emissões de carbono em projetos de edificações: um estudo de caso na Bahia. In: ENCONTRO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO AMBIENTAL E MEIO AMBIENTE, 25., 2023, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: FEA/USP, 2023. Disponível em: <https://engemasp.submissao.com.br/25/anais/arquivos/113.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2025.

SILVA, F. B.; JOHN, V. M. Actual sources of life cycle impacts: elementary processes and flows causing environmental impacts for a typical Brazilian building. **Building and Environment**, [s. l.], v. 249, 111151, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111151>. Acesso em: 27 jan. 2026.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Guia metodológico para inventários de emissões de gases de efeito estufa na construção civil**: setor edificações. São Paulo: SindusCon-SP, 2022. Disponível em: <https://sindusconsp.com.br/download/guia-metodologico-para-inventarios-de-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-na-construcao-civil-setor-edificacoes/>. Acesso em: 9 jul. 2025.

STACHERA JUNIOR, Theodozio. Avaliação de emissões de CO₂ na construção civil: um estudo de caso da habitação de interesse social no Paraná. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 28., 2008, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ABEPRO, 2008.

STAVINS, Robert N. **The Future of U.S. Carbon-Pricing Policy**: normative assessment and positive prognosis. Cambridge: Harvard Kennedy School, 2019. (HKS Working Paper, n. RWP19-017). Disponível em: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3399122. Acesso em: 15 jun. 2025.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA. Faculdade de Engenharia. **CasaCO**: ferramenta para estimativa de emissões de em edificações. Juiz de Fora: UFJF, 2017. Software. Disponível em: <https://casaco.eco.br/>. Acesso em: 21 fev. 2026.

U.S. GREEN BUILDING COUNCIL. **Brazil Ranks Number Fourth in the World for LEED Green Building in 2022.** [S. l.]: GBCI, 2024. Disponível em: <https://www.gbci.org/brazil-ranks-number-fourth-world-leed-green-building-2022>. Acesso em: 27 jan. 2026.

U.S. GREEN BUILDING COUNCIL. **USGBC releases annual list of Top 10 Countries and Regions for LEED in 2021.** [S. l.]: USGBC, 2022. Disponível em: <https://www.usgbc.org/articles/usgbc-releases-annual-list-top-10-countries-and-regions-leed-2021>. Acesso em: 27 jan. 2026.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Global Status Report for Buildings and Construction: 2023.** Nairobi: UNEP, 2024 (dados consolidados de 2023).

UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change. **Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change.** Kyoto: UNFCCC, 1997. Disponível em: https://unfccc.int/kyoto_protocol. Acesso em: 21 fev. 2026.

VARGAS, Daniel Barcelos; DELAZERI, Linda Márcia Mendes; FERREIRA, Vinícius Hector Pires. **Mercado de carbono voluntário no Brasil: na realidade e na prática.** São Paulo: FGV Agro, 2021. Disponível em: https://agro.fgv.br/sites/default/files/2023-05/ocbio_mercado_de_carbono_1.pdf. Acesso em: 9 jul. 2025.

WACKERNAGEL, M.; REES, W. **Our ecological footprint: reducing human impact on the Earth.** Gabriola Island: New Society Publishers, 1996. (New Catalyst Books).

WORLD GREEN BUILDING COUNCIL. **Bringing embodied carbon upfront: coordinated action for the building and construction sector to tackle embodied carbon.** Londres: WorldGBC, 2019.

WACKERNAGEL, M.; REES, W. **Our ecological footprint: reducing human impact on the Earth.** Gabriola Island: New Society Publishers, 1996. (New Catalyst Books).

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).** Genebra: WMO, 2026. Disponível em: <https://wmo.int/activities/intergovernmental-panel-climate-change-ipcc>. Acesso em: 7 jan. 2026.

WORLD RESOURCES INSTITUTE; WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard: supplement to the GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard.** Washington, DC: WRI/WBCSD, 2013. 152 p.

WORLD RESOURCES INSTITUTE; WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **The Greenhouse Gas Protocol: a corporate accounting and reporting standard.** Revised edition. Washington, DC: WRI/WBCSD, 2004.

ZIOLO, M.; BAK, I.; CHEBA, K. Environmental taxes: how public policy makers can use them in the decision-making process?. **Procedia Computer Science**, [s. l.], v. 159, p. 2216-2225, 2019.