

Emissões de CO₂ de Edificações no Brasil: uma revisão sistemática sobre o ciclo de vida

CO₂ Emissions from Buildings in Brazil: a systematic review of the life cycle

Samira Gomes Alencar¹, Luciane Cleonice Durante¹, Luciana Pelaes Mascaro¹, Ivan Julio Apolonio Callejas¹

¹Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, Brasil

Resumo

As emissões de gases de efeito estufa pelo setor de edificações da construção civil contribuem significativamente para o aquecimento global, tornando essencial a adoção de medidas mitigadoras. Este trabalho tem como objetivo identificar os principais estudos que quantificam emissões de CO₂, ao longo do ciclo de vida das edificações, visando auxiliar na escolha das tipologias construtivas durante as fases de projeto e planejamento. A metodologia adotada foi a revisão sistemática de literatura, com um recorte temporal de 20 anos, considerando o panorama de produção científica brasileira. Foram analisados 15 estudos sobre emissões de carbono em edificações, que evidenciaram as contribuições de diferentes sistemas construtivos. O estudo mapeia as pesquisas existentes e consolida indicadores de emissões de CO₂ associados às diversas tipologias construtivas no Brasil, contribuindo para um melhor entendimento do impacto ambiental no setor.

Palavras-chave: Emissões de CO; Carbono Embutido; Revisão Sistemática.

Áreas Tecnológicas: Construção Civil. Emissões de CO₂.

Abstract

Greenhouse gas emissions from the civil construction sector significantly contribute to global warming, making the adoption of mitigating measures essential. This work aims to identify the main studies that quantify CO₂ emissions throughout the life cycle of buildings, to assist in the selection of construction typologies during the design and planning phases. The adopted methodology was a systematic literature review, with a temporal cut of 20 years, considering the panorama of Brazilian scientific production. Fifteen studies on carbon emissions in buildings were analyzed, which highlighted the contributions of different construction systems. The study maps existing research and consolidates CO₂ emissions indicators associated with various construction typologies in Brazil, contributing to a better understanding of the environmental impact in the sector.

Keywords: CO Emissions; Embodied Carbon; Systematic Review.



1 Introdução

A partir da Revolução Industrial, no século XVIII, observa-se o crescimento das emissões de gases de efeito estufa na atmosfera, sendo que as provenientes da indústria da construção, incluindo edifícios e infraestrutura, correspondem por mais de um quinto das emissões globais (UNEP, 2024). Logo, é imprescindível buscar alternativas que visem reduzir o impacto desse setor.

Quando são abordadas as edificações, foco deste estudo, as emissões compreendem o carbono embutido na fase de construção (emissões de transporte, de extração e de fabricação dos materiais construtivos), na fase de uso, operação e manutenção do edifício e na fase final do ciclo de vida (descarte, retrofit ou reforma, com destinação dos resíduos) (Caldas; Sposto, 2017; Tavares, 2006).

Segundo a UNEP (2024), estima-se um aumento da área edificada mundial de mais de 15% até 2030, o que adicionará quase 40 bilhões de metros quadrados ao estoque edificado atual e, conseqüentemente, maior consumo de energia na fase de operação do edifício, cuja intensidade energética atual é de 150 kWh/m² (IEA; IRENA; UN, 2023). Nesse sentido, uma das alternativas de mitigação desse impacto é melhorar a eficiência energética das edificações em todas as fases do ciclo de vida, visando atingir as metas globais de descarbonização até 2050.

Mais de 50% desse aumento se concentrará nos países emergentes localizados em regiões de clima quente e que não possuem políticas de eficiência energética de edificações, o que pode gerar o aumento da demanda de energia para fins de resfriamento e o uso de sistemas de refrigeração pouco eficientes. Nesse sentido, considerando os cenários de aquecimento global, para minimizar o impacto social do aquecimento global e da procura por sistemas de arrefecimento, as estratégias desses países devem se voltar para a proteção de populações vulneráveis expostas ao calor intenso por meio da promoção da capacidade adaptativa das edificações, de técnicas de resfriamento passivo e de tecidos urbanos mais resilientes. Por outro lado, em países de clima frio, como consequência do aquecimento global, a demanda de aquecimento ambiental tende a diminuir, e a estratégia se volta para a eficiência dos sistemas de aquecimento, com substituição de aquecedores a gás, carvão e óleo por elétricos.

Em termos globais, há o risco de que as melhorias na eficiência energética nos climas mais frios não compensem os sistemas menos eficientes implementados nos climas mais quentes. Já na perspectiva do carbono incorporado, nos países emergentes com as atividades do setor da construção em crescente avanço, o acesso aos materiais construtivos de baixo carbono é limitado, por isso há o risco de aumento das construções com alto carbono incorporado.

Nesse sentido, surgem as abordagens que enfatizam carbono líquido zero em todo o ciclo das edificações, baseados em eficiência energética (IEA; IRENA; UN, 2022). Na base estão os edifícios energeticamente eficientes, que apresentam economia de energia na fase de construção e uso, com sistemas de aquecimento, refrigeração, iluminação otimizados. Em seguida, tem-se os edifícios de baixo carbono, que incluem as características anteriores e incorporaram recursos de baixo carbono nas fontes de energia. Já os edifícios quase zero carbono apresentam alta eficiência energética e incluem alguma forma de energia com emissão zero, porém sem conseguir neutralizar completamente seu consumo de energia. Edifícios de carbono líquido zero atendem às necessidades energéticas com fontes de emissão zero durante um determinado período, normalmente um ano. Edifícios zero carbono garantem que toda a sua demanda de energia seja atendida com energia de emissão zero durante um tempo maior. Edifícios carbono negativo produzem mais energia renovável do que consomem, contribuindo com o excedente para uso externo. Por fim, edifícios com zero carbono líquido representam o auge da sustentabilidade e inovação, mantendo o *status* de carbono zero e garantindo, ao mesmo tempo, que as emissões incorporadas dos seus materiais de construção sejam compensadas no ciclo de vida.

No Brasil, as iniciativas para descarbonização da indústria da construção civil, setor de Edificações, são incipientes. Destaca-se a iniciativa do Selo Procel Edifica, desde 2010, ainda em condição de adesão voluntária para os empreendimentos residenciais, comerciais e institucionais. Houve um avanço nesse regulamento em 2021, quando sua revisão propôs a conversão de todos os consumos elétricos das edificações em energia primária, o que permite uma visão mais assertiva das emissões de CO₂ equivalentes (PBE Edifica, 2025). Para além disso, em 2023, o Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovação noticiou um programa de descarbonização da indústria da construção organizado em quatro componentes: i) construção e adoção de um *roadmap* para estabelecimento de políticas que fortaleçam os ecossistemas de inovação para acelerarem a expansão de edifícios net-zero; ii) fornecimento de evidências sobre a viabilidade social, econômica e ambiental de construções net-zero para os tomadores de decisão, financiadores públicos, iniciativa privada e sociedade civil; iii) priorização das construções escolares, pois possuem potencial para se tornarem edifícios net-zero com mais facilidade, tendo em vista as características construtivas, que, em geral, têm um ou dois pavimentos e grandes áreas com potencial para receber painéis fotovoltaicos, com número estimado de 178 mil unidades no Brasil; e iv) fortalecimento de instrumentos inovadores de financiamento para expansão e garantia de investimento de longo prazo em edifícios de baixa emissão e net-zero (Brasil, 2023).

Diante do exposto, o objetivo geral deste artigo é analisar indicadores relacionados às emissões de carbono em todas as fases do ciclo de vida de edificações brasileiras, a saber: técnicas utilizadas e ferramentas existentes para quantificação, subsidiando a construção de um panorama brasileiro acerca das tipologias construtivas que já possuem suas emissões identificadas.

2 Metodologia

A metodologia adotada neste estudo é baseada na revisão sistemática, conforme os indicam os princípios propostos pelo Design Science Research (DSR) (Morandi; Camargo, 2015). O propósito é responder à seguinte questão central: Quais as emissões de CO₂ das edificações brasileiras relacionadas às fases do ciclo de vida?

Foram utilizadas duas plataformas de busca: o Portal de Periódicos da Capes e a Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD). A janela temporal da pesquisa abrange os últimos 20 anos, e as palavras-chave empregadas nas buscas em língua portuguesa foram: “carbono embutido AND construção civil”, “energia embutida AND construção civil”, “emissões de CO₂ AND construção civil”, em qualquer idioma e campo do título ou termos-chave.

Com os resultados obtidos, foi realizada uma triagem inicial por meio da leitura dos títulos para verificar sua compatibilidade com a temática do estudo. Na sequência, os resumos dos estudos pré-selecionados foram analisados e os trabalhos foram classificados de acordo com as seguintes dimensões: Qualidade da execução, Adequação à problemática e Adequação ao foco (Quadro 1), conforme

a atribuição dos critérios de ponderação apresentado no Quadro 2 (Dresh; Lacerda; Antunes Júnior, 2014).

A análise dos trabalhos foi realizada por meio do vínculo entre a temática da produção encontrada e a questão-chave deste estudo. Logo, relaciona-se a quantificação de carbono, a energia embutida nas fases de construção, o uso/operação e o descarte com as tipologias construtivas praticadas no território brasileiro, bem como os insumos da construção civil.

Após a classificação dos estudos, somente aqueles com ponderação Alta em todos os três critérios de qualidade foram selecionados para compor o *corpus* de pesquisa (Dresh; Lacerda; Antunes Júnior, 2014).

As publicações que compuseram o corpus da pesquisa foram lidas e analisadas em profundidade com o intuito de extrair deles subsídios para a resposta da questão-problema. Elaborou-se uma síntese dos sistemas construtivos abordados pelas publicações, evidenciando um indicador de emissões de CO₂ por unidade de área da edificação e a fase do ciclo de vida considerado.

3 Resultados e Discussão

A busca pelas palavras-chave resultou em 191 trabalhos, dos quais 51 foram selecionados pela análise dos títulos e, após a leitura dos resumos, 20 estudos foram selecionados para compor a revisão (Tabela 1). O Quadro 2 apresenta os 20 trabalhos selecionados, juntamente com suas respectivas classificações nos critérios de qualidade. Entre eles, 15 estudos receberam ponderação “Alta” e foram incluídos nesta revisão sistemática, sendo 12 dissertações e três artigos.

Quadro 1 – Dimensão e classificação dos trabalhos

CRITÉRIO	QUALIDADE DA EXECUÇÃO DO ESTUDO AO ESTUDO PROPOSTO	ADEQUAÇÃO À PROBLEMÁTICA DO ESTUDO PROPOSTO	ADEQUAÇÃO AO FOCO DO ESTUDO PROPOSTO
Alta	Atende aos padrões demandados para o tema em estudo ou o estudo seguiu rigorosamente o método proposto e os resultados se respaldam em fatos e dados.	Trata-se do mesmo objeto de estudo da revisão.	Idênticas às da revisão.
Média	Apresenta lacunas em relação aos padrões demandados para o tema em estudo ou o estudo não demonstra ter seguido o método proposto em sua totalidade.	Trata-se de forma parcial ao estudo da revisão.	Similar às da revisão.
Baixa	Apresenta inconformidades em relação aos padrões demandados para o tema em estudo ou o estudo não obedeceu ao método proposto.	Trata-se de forma minimamente parcial ao estudo da revisão.	Distintas às da revisão.

Fonte: Adaptado de Dresh, Lacerda e Antunes Júnior (2014)

Tabela 1 – Produções encontradas nas plataformas de busca por palavra-chave e selecionadas após leitura dos títulos e resumos

PLATAFORMA		CAPES			BDTD			TOTAL
Palavra-chave		carbono embutido AND construção civil	energia embutida AND construção civil	emissões de CO ₂ AND construção civil	carbono embutido AND construção civil	energia embutida AND construção civil	emissões de CO ₂ AND construção civil	
Quantidade de produções	Encontradas	2	1	45	8	20	115	191
	Selecionadas pelo título	2	1	14	3	4	27	51
	Selecionadas pelo resumo	1	0	5	2	1	11	20

Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (2024)

Quadro 2 – Avaliação das produções

REFERÊNCIA	TIPOLOGIA DE PUBLICAÇÃO	CRITÉRIOS DE QUALIDADE			CRITÉRIO DE PONDERAÇÃO
		QUALIDADE DE EXECUÇÃO	ADEQUAÇÃO À QUESTÃO	ADEQUAÇÃO À TEMÁTICA	
Cunha (2016)	Dissertação	Alta	Alta	Alta	Alta
Caldas e Sposto (2017)	Artigo	Alta	Alta	Alta	Alta
Santoro e Kripka (2016)	Artigo	Alta	Média	Média	Média
Freitas et al. (2017)	Artigo	Alta	Média	Média	Média
Silva et al. (2024)	Artigo	Alta	Alta	Alta	Alta
Araújo e Sattler (2018)	Artigo	Alta	Alta	Alta	Alta
Lobo (2010)	Dissertação	Alta	Alta	Alta	Alta
Oliveira (2016)	Dissertação	Alta	Alta	Alta	Alta
Azevedo (2019)	Dissertação	Alta	Alta	Alta	Alta
Stachera Junior (2006)	Dissertação	Alta	Média	Média	Média
Pereira (2014)	Dissertação	Alta	Alta	Alta	Alta
Silva (2017)	Dissertação	Alta	Alta	Alta	Alta
Postay (2015)	Dissertação	Alta	Alta	Alta	Alta
Kozloski (2020)	Dissertação	Alta	Alta	Alta	Alta
Barletta (2022)	Dissertação	Alta	Alta	Alta	Alta
Deeke (2009)	Dissertação	Alta	Média	Média	Média
Marcos (2009)	Dissertação	Alta	Alta	Alta	Alta
Caldas (2016)	Dissertação	Alta	Alta	Alta	Alta
Silva (2014)	Dissertação	Alta	Alta	Alta	Alta
Silva (2012)	Dissertação	Alta	Média	Média	Média

Fonte: Elaborado pelos autores deste artigo (2024)

Foram sete produções selecionadas que quantificam emissões considerando a localização do estudo, com a seguinte distribuição geográfica: i) Caldas (2016) no Distrito Federal (DF); ii) Barletta (2022) em Minas Gerais (MG); iii) Silva *et al.* (2024) em Pernambuco (PE); iv) Marcos (2009), Lobo (2010), Oliveira (2016), Silva (2017) e Azevedo (2019) no Paraná (PR); v) Pereira (2014), Postay (2015), Cunha (2016), Araújo e Sattler (2018) e Kozloski (2020) no Rio Grande do Sul (RS); vi) Silva (2014) em Santa Catarina (SC); e vii) Caldas e Sposto (2017) em todas as capitais brasileiras.

Em todo o território brasileiro, Caldas e Sposto (2017) quantificaram as emissões de CO₂ do transporte (com base na distância das indústrias até as 26 capitais brasileiras) de blocos estruturais cerâmicos e de concreto, por meio da metodologia de Análise do Ciclo de Vida de Emissões de CO₂ (ACVCO₂), considerando as emissões das indústrias inseridas no Programa Setorial de Qualidade (PSQ). As emissões devido ao transporte são proporcionais a distância das fábricas, sendo 22,8 e 24,5kgCO₂/m², para os blocos de concreto e cerâmico, respectivamente. As emissões de transporte do bloco de concreto são 7% menor que a do bloco cerâmico e ambos contribuem significativamente para o carbono total de uma edificação. Por fim, os autores propuseram uma matriz e um fluxograma para a gestão das emissões de dióxido de carbono do transporte.

No Distrito Federal, Caldas (2016) realizou análise do ciclo de vida energético (ACVE) e de emissões de CO₂ (ACVCO₂) de uma edificação unifamiliar com 45,64m², localizada em Brasília (DF), na fase operacional do ciclo de vida, por meio do *software* de simulação termoenergética Design Builder. O autor analisou dois sistemas de vedações verticais, uma em Light Steel Framing (LSF) e outra em blocos cerâmicos, com pilares e vigas de concreto armado, nas fases de construção, uso/operação e fim do ciclo de vida. Foram utilizados distintos dados de inventários de emissões nacionais e internacionais. O modelo em LSF apresentou valores de entre 1,43 tCO₂/m² a 1,61 tCO₂/m², com valor médio de 1,52tCO₂/m² (1.520 kgCO₂/m²). A alvenaria de blocos cerâmicos, com pilares e vigas de concreto armado, apresentou valores entre 1,44 tCO₂/m² a 1,74 tCO₂/m², com valor médio de 1,56 tCO₂/m² (1.560 kgCO₂/m²). Logo, conclui-se que, para Brasília, a vedação em LSF é mais vantajosa tanto do ponto de vista energético quanto das emissões de carbono.

Em Minas Gerais, Barletta (2022) propôs um método para a escolha de soluções construtivas para edificações, com base nos quesitos de CO₂ embutido e custo. O autor utilizou uma planilha eletrônica para comparar os materiais das etapas construtivas: parede, piso, cobertura, portas, janelas e estrutura. Traz uma síntese dos quantitativos de CO₂ por material e propõe a utilização da planilha eletrônica CasaCO, para aplicação com um parâmetro de custo.

A planilha permite comparar até cinco edificações, com combinações diferentes para cada etapa. Para composição de custo, o autor utilizou o TCPO, a SINAPI e outras. O objeto de estudo foi o projeto de edifício residencial de porte médio, de quatro pavimentos, com aproximadamente 1.000m² de área construída, localizado no município de Juiz de Fora (MG). A partir disso, o autor realizou um comparativo entre as emissões de CO₂ para as cinco tipologias distintas de edificações, considerando vida útil da edificação de 100 anos, sendo em ordem decrescente: i) Edificação 2: alvenaria de bloco de concreto, piso cerâmico e em tacos de madeira, cobertura de telha cerâmica, janelas e portas de madeira – 152,2kgCO₂/m²; ii) Edificação 5: alvenaria de bloco cerâmico vazado, piso cerâmico e em tacos de madeira, cobertura de telha cerâmica, janelas e portas de alumínio – 150,3kgCO₂/m²; iii) Edificação 3: alvenaria de bloco cerâmico vazado, piso cerâmico, cobertura de telha cerâmica, janelas e portas de madeira – 149,1kgCO₂/m²; iv) Edificação 1: alvenaria de bloco cerâmico vazado, piso cerâmico e em tacos de madeira, cobertura de telha cerâmica, janelas e portas de madeira – 142,1kgCO₂ /m²; v) Edificação 4: alvenaria de bloco cerâmico vazado, piso cerâmico e em tacos de madeira, cobertura de telha de concreto, janelas e portas de madeira – 131,5kgCO₂/m².

A estrutura e as paredes representam os maiores percentuais de 36,5% e 42,3% em média, respectivamente, devido aos insumos envolvidos na composição das vedações, por exemplo, a alvenaria de bloco de concreto e de bloco cerâmico vazado. Além disso, a mudança do material das esquadrias de alumínio para madeira também influenciou a redução das emissões de dióxido de carbono, sendo que as esquadrias de madeira apresentam em média 0,42% das emissões das edificações, enquanto com o alumínio esse percentual é de 5,84%. Dessa maneira, percebe-se que a edificação com alvenaria em bloco cerâmico com esquadrias de madeira e revestimento de piso em madeira é a que produziu menos emissões.

Em Pernambuco, Silva *et al.* (2024) quantificaram a emissão total de CO₂ de uma edificação no município de Garanhuns (PE), com 1.194,93m² de área construída, caracterizada por possuir térreo e cinco pavimentos. Os materiais construtivos consistem em aço, bloco cerâmico, cimento, concreto usinado, areia e brita, os quais foram estimados na fase do ciclo de vida da construção (ou pré-operacional), desde a sua produção, extração e transporte. O método relaciona a emissão estimada de CO₂ ao consumo de material e ao fator de emissão individual. Os autores identificaram que a emissão de CO₂ da edificação variou de 190,43 a 243,72 tCO₂, totalizando 159,37 e 203,93kgCO₂/m² de área construída. Além disso, reforçaram a necessidade de desenvolvimento de materiais sustentáveis para a construção civil, com o intuito de minimizar as emissões de carbono. Os materiais que mais contribuiriam

foram o cimento e o concreto usinado, com 44% e 48%, respectivamente.

Marcos (2009), no Paraná, apresentou uma análise da emissão de CO₂ na fase pré-operacional (fabricação e transporte) de habitações de interesse social, sendo uma com 34m² de alvenaria convencional (composta de paredes de alvenaria, cimento e argamassa) e, outra com 42m², no sistema construtivo *wood frame*. A partir disso, com a análise quantitativa da energia embutida das emissões dos materiais e com o auxílio do ArchiCad (ferramenta Building Information Modeling – BIM), concluiu que a HIS construída de modo convencional emite cerca de 6tCO₂, aproximadamente 0,176tCO₂/m² (176,5kgCO₂/m²), enquanto a habitação de madeira emite cerca de 2tCO₂, aproximadamente 0,05tCO₂/m² (47,62kgCO₂/m²). Dessa maneira, o sistema construtivo em madeira é no mínimo três vezes menos poluente que o sistema construtivo em alvenaria na fase pré-operacional.

Também no Paraná, Lobo (2010) calculou a energia embutida e a emissão de CO₂eq de uma edificação pública existente, com área de 184,0m² e sistema construtivo em estrutura de concreto armado e alvenaria convencional de blocos cerâmicos. O autor considerou a fase pré-operacional (produção e transporte dos insumos). A etapa construtiva da alvenaria corresponde a 25% do total da obra, contribuindo com a emissão de 17,19 tCO₂, já a etapa de concreto armado corresponde a 23,38% das emissões. A limpeza foi a etapa com menor emissão (0,0403 tCO₂). O total de emissões da edificação é de 105.293,96 kgCO₂. Como resultado do modelo analisado, foram obtidas a energia embutida de 4,23 GJ/m² e as emissões de 572,25 kgCO₂/m².

Oliveira (2016), no Paraná, apresentou um estudo sobre a quantidade de energia embutida e de CO₂ embutido de edificações em *wood frame*, sistema composto de madeira estrutural e de placas de OSB. O método consiste na Análise de Ciclo de Vida para a realização das análises energéticas nos processos industriais dos materiais. Dessa maneira, o autor apresentou o resultado de carbono e energia embutida para dois padrões construtivos, o padrão “A” (sistema de vedação vertical leve de madeira, com paredes externas e internas (135mm) e paredes de geminação (185mm); paredes estruturais, formadas por peças de madeira serradas autoclavadas, a face externa em OSB, revestida com placa cimentícia e face interna em chapas de gesso acartonado aplicadas sobre chapas de OSB. Além disso, as paredes de geminação possuem núcleo em manta de lã de vidro. A cobertura é de estrutura metálica ou madeira, com telhas cerâmicas, forro em PVC e manta de lã de vidro) e padrão “B” (sistema construtivo leve em madeira, formado por montantes e vigas de madeira maciça e chapas estruturais, enrijecida por painéis OSB ou *fiberboard* que compõem a vedação externa; vedação interna em *drywall*). A base de dados para o cálculo do CO₂ embutido dos insumos *drywall* e chapa cimentícia é a de Hammond e Jones (2011), e as

emissões para OSB e madeira estrutural foram estimadas. Foram analisados cinco cenários, distintos entre si para os Padrões A e B. No cenário 1, foram consideradas as operações florestais e obteve-se 2.506,13kgCO₂/m² para o Padrão A e 2.462,59kgCO₂/m² para o B. No segundo cenário, não foram consideradas as operações florestais, obtendo-se 108,08kgCO₂/m² e 85,40kgCO₂/m² para os padrões A e B, respectivamente. No terceiro cenário, incluiu-se na análise o estoque de carbono dos produtos de madeira, mantendo os dados do segundo cenário e foi obtido 11,32kgCO₂/m² para o padrão A e -12,45kgCO₂/m² para o B. No quarto cenário, foi feita análise *cradle-to-gate* (do berço ao túmulo), ou seja, em todo o ciclo de vida, obtendo-se 74,38kgCO₂/m² (Padrão A) e 50,23kgCO₂/m² (Padrão B). Por fim, o quinto cenário incluiu as etapas de plantio, estabelecimento da floresta, gestão, desbaste, derrubada da tora, trituração e transporte, obtendo-se 110,83kgCO₂/m² (Padrão A) e 88,23kgCO₂/m² (Padrão B). O autor conclui que as razões da discrepância entre o primeiro cenário e os demais, consiste nos resultados inesperados dos processos de exploração da madeira. Além disso, com o balanço de carbono e considerando o CO₂ de madeira serrada, a emissão diminuiu em 240%, justificando o resultado negativo. Dessa maneira, concluiu-se que o Padrão A emite mais CO₂, que o Padrão B.

Silva (2017), ainda no Paraná, apresentou uma Avaliação de Ciclo de Vida Energético (ACVE) e Avaliação do Ciclo de Vida de Emissões de CO₂ (ACVCO₂), de sistemas de vedação vertical interna e externa, com a metodologia proposta pela NBR-ISO 14040 – Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura (ABNT, 2009). O objeto de estudo foi uma habitação rural, modelo do Programa Nacional de Habitação Rural (PNHR), com 63,86 m² localizada no município de Cascavel (PR), para uma vida útil de 50 anos, contemplando as fases do ciclo de vida de construção, uso/operação e fim do ciclo. Os sistemas construtivos analisados foram: estrutura de concreto armado com vedação de blocos cerâmicos; alvenaria estrutural com blocos de concreto; *steel frame* com vedação de OSB; e parede de concreto moldada no local. Na fase pré-operacional, foram obtidos os seguintes valores para cada sistema construtivo: 13,27 tCO₂, 12,44 tCO₂, 7,32 tCO₂, 8,85 tCO₂, respectivamente. Já na fase de uso, foram obtidos 0,51 tCO₂, 0,51 tCO₂, 4,31 tCO₂ e 0,51 tCO₂. Na fase do fim do ciclo de vida, tem-se 0,21 tCO₂, 0,21 tCO₂, 0,03 tCO₂ e 0,22 tCO₂, respectivamente. Dessa maneira, o autor totalizou na estrutura de concreto armado com blocos cerâmicos (610 kgCO₂/m²); na alvenaria estrutural com blocos de concreto (600 kgCO₂/m²); no *steel frame* com OSB (560 kgCO₂/m²); e na alvenaria em parede de concreto (570 kgCO₂/m²). Desse modo, o autor conclui que a alvenaria em *light steel frame* com OSB é a solução mais sustentável.

Também no Paraná, Azevedo (2019) desenvolveu a Análise do Ciclo de Vida Energético (ACVE) e de CO₂ (ACVCO₂) de uma Habitação de Interesse Social (HIS) em *wood frame*, com 46,50m². A edificação em *wood frame* possui fundação em *radier*, estrutura é composta de montantes de madeira de seção 4x9 cm, espaçados de 40 cm, o fechamento escolhido é composto de: (1) gesso acartonado com acabamento em pintura e/ou cerâmica; (2) estrutura em pinus tratamento com CCA; (3) OSB; (4) membrana hidrófuga; e (5) placa cimentícia com acabamento. Em áreas molhadas, foram consideradas (6) placas de gesso acartonado com resistência à umidade. A cobertura é de treliças pré-fabricadas com 4x9 cm em madeira pinus, vedadas com telha cerâmica sobre ripas e com beiral de 60 cm. As treliças do oitão foram vedadas com placas OSB, membrana hidrófuga e placa cimentícia. Os índices de emissões e energia embutida se baseiam no estudo de Tavares (2006) e Hammond e Jones (2011). A partir do referencial teórico, calculou a Energia Embutida (EE) e as Emissões de CO₂ dos materiais utilizados nas etapas pré-operacional, operacional e pós-operacional. A etapa operacional inclui a manutenção da edificação, o uso de equipamentos elétricos e cocção. O autor concluiu que os materiais que mais contribuíram para as emissões de CO₂ e os índices de EE foram a placa de gesso, tintas, concreto de fundação e telha cerâmica. Essa habitação emitiu 43,18tCO₂ (928,6 kgCO₂/m²). Ao comparar essa tipologia construtiva com as de concreto e aço, concluiu que a HIS em *wood frame* emitiu menos carbono em todo o ciclo de vida (38,31tCO) se comparada às construções tradicionais.

No Rio Grande do Sul, Pereira (2014) quantificou as emissões de CO₂ e a energia embutida em três tipologias de coberturas de edificações: duas coberturas verdes com 28,41m² em Porto Alegre e, com 56,6m² em Santa Maria; uma de fibrocimento em Porto Alegre e uma de telhas cerâmicas, em Santa Maria, considerando as fases pré-operacional e operacional. A metodologia da pesquisa baseou-se nos trabalhos de Sperb (2000), Tavares (2006), Oliveira (2009) e Baldessar (2012). Para Porto Alegre, foram obtidos os seguintes resultados para coberturas verdes (1.641kgCO₂ ou 57,76kgCO₂/m²), para telhas cerâmicas (3.019,04kgCO₂ ou 106,27kgCO₂/m²) e para telhas de fibrocimento (2.704,80 kgCO₂ ou 95,21kgCO₂/m²). Já em Santa Maria, obteve-se para cobertura verde 2.642,15kgCO₂ (46,68 kgCO₂/m²), para telhas cerâmicas 4.182,30kgCO₂ (73,89kgCO₂/m²) e para as telhas de fibrocimento foi obtido 3.674,07kgCO₂ (64,91kgCO₂/m²). Por fim, o autor conclui que as coberturas verdes reduzem a emissão de CO₂, além de proporcionar o sequestro de carbono ao longo do seu ciclo de vida.

Ainda no Rio Grande do Sul, Postay (2015) elaborou uma correlação entre compacidade, energia incorporada e emissões de CO₂, em projetos de Habitação de Interesse

Social (HIS). No que diz respeito à energia incorporada e às emissões de CO₂, houve a quantificação dos materiais de construção da edificação. O método utilizado para a quantificação foi por meio do *software* Cambridge Engineering Selector (CES Selector), por meio do módulo Constructor, o qual permite a personalização dos dados. Além disso, utilizou também a ferramenta Eco Audit Tool, a qual realiza uma análise dos impactos ambientais de produtos em seu ciclo de vida. A partir disso, usou o banco de dados do próprio programa, referente às emissões de CO₂ e energia incorporada dos materiais. O autor ressalta que, em relação às emissões, estas foram calculadas apenas na fase pré-operacional. As emissões para o projeto com 204m² de área construída em três tipos de sistemas de vedações são: alvenaria estrutural de bloco cerâmico (1.549kgCO₂/m²), de bloco de concreto (299kgCO₂/m²) e paredes de concreto (294kgCO₂/m²), concluindo que a parede de concreto é a menos emissora dentre as três tipologias.

Cunha (2016), também no Rio Grande do Sul, apresentou a quantificação das emissões de dióxido de carbono de 20 unidades residenciais unifamiliares, com área unitária de 42,89 m². Foi realizado um levantamento das etapas e serviços, do quantitativo dos materiais e serviços e das emissões de CO₂ dos materiais. Essa quantificação foi realizada por meio da metodologia proposta por Tavares (2006), via Análise do Ciclo de Vida Energético (ACVE), considerando a fase pré-operacional da edificação. O autor chegou ao resultado de emissão total de 60.157kgCO₂, com a utilização dos principais componentes da construção civil residencial, sendo esses o aço, os agregados, os tijolos cerâmicos vermelhos, o cal e o cimento. Além disso, o autor fez o comparativo da substituição dos tijolos cerâmicos por blocos de concreto e de solo-cimento, concluindo que a troca por este último não é vantajosa, uma vez que as emissões de dióxido de carbono aumentaram em 1.873,29kgCO₂. Todavia, a alteração da edificação para blocos de solo-cimento apresentou menor impacto ambiental, com redução de 8.018kgCO₂ do total inicial. Dessa maneira, consegue-se calcular as emissões de CO₂ por m², tendo como resultados para alvenaria em bloco de solo cimento 1.215kgCO₂/m², para bloco de concreto 1.446kgCO₂/m² e para tijolos cerâmicos 1.402kgCO₂/m².

Araújo e Sattler (2018), no Rio Grande do Sul, realizaram a aplicação de uma ferramenta BIM para auxiliar o processo de quantificação de CO₂ na Avaliação do Ciclo de Vida no projeto de edificações, nas fases pré-operacional e operacional. Os autores integraram dados de emissão de dióxido de carbono dos materiais ao quantitativo do projeto, obtendo valores por unidade de área. A habitação estudada possuía 48,50m², em três tipologias distintas: i) alvenaria de tijolo cerâmico maciço, cobertura em telha cerâmica e estrutura em madeira, com fundação em blocos de granito; ii) alvenaria de bloco de solo cimento, cobertura de telha ecológica feita de papel reciclado e madeira e com fundação

em bloco de granito; iii) alvenaria em bloco de concreto, cobertura em telha sanduíche de aço e EPS e estrutura de madeira com fundação em concreto. Obtiveram emissão total de 405.329,87 kg, 400.937,76 kg e 585.843,30 kg de carbono e 8266,75 kgCO₂/m², 8.357,32 kgCO₂/m² 12.069,04 kgCO₂/m², respectivamente. Os autores concluíram que a ferramenta atende as expectativas, todavia ainda devem ser realizadas melhoras no processo de inserção de dados no sistema, uma vez que esse ainda é trabalhoso.

Também no estado do Rio Grande do Sul, Kozloski (2020) apresentou uma Revisão Sistemática de Literatura (RSL) referente às avaliações do carbono e de energia incorporada nas edificações, com o fito de desenvolver uma ferramenta que estime o carbono embutido, com base nos dados de emissão dos materiais da construção civil. No que diz respeito a criação da ferramenta, desenvolveu-se no editor de planilha Microsoft Excel. Utilizaram-se dados nacionais secundários e procedimentos de cálculo identificados durante a RSL, considerando vida útil da edificação de 50 anos e os seguintes materiais: aço, areia, argamassa industrializada, brita, bloco de concreto, cal, cimento, revestimento cerâmico, telhas de cerâmica, de concreto e de fibrocimento, tijolo cerâmico e uma composição para concreto moldado no local. Os fatores de emissões (kgCO₂/kg) foram extraídos dos trabalhos de Caldas (2016), Piva (2019), Madeira (2019), Indiviata (2017), Teodoro (2017) e Tavares (2006). A edificação modelo foi a mesma adotada por Piva (2019), para fins comparativos das emissões, com área total de 495,25 m², fundação e estrutura em concreto armado, vedações em bloco cerâmico, cobertura de telha cerâmica e de fibrocimento e esquadrias em vidro e madeira. A emissão total foi de 101.546,64 kgCO₂, correspondendo a 205,04 kgCO₂/m². Desse modo, a ferramenta possui uma aplicação eficiente para análise do carbono e da energia incorporada na etapa projetual das edificações.

No estado de Santa Catarina, Silva (2014) apresentou um inventário de fases de efeito estufa (GEE), durante a fase de construção de edificações residenciais multifamiliares, com o objetivo de identificar as principais fontes de emissões de CO₂ e gerar indicadores de CO₂/m². A metodologia é baseada no GHG Protocol, por ser uma das ferramentas mais utilizadas na contemporaneidade, para avaliar, quantificar e gerenciar as emissões de GEE. O autor destaca que, em média, as emissões de supraestrutura de concreto armado correspondem a 123,54 kgCO₂/m², para alvenaria em tijolo cerâmico 19,51 kgCO₂/m² e revestimentos argamassados 16,15 kgCO₂/m². Dessa maneira, somando as emissões das composições, tem-se a emissão total de 159,2 kgCO₂/m² na fase pré-operacional. Conclui-se que, no cenário nacional, existem pesquisas

que visam a minimizar as emissões de CO₂, com o auxílio de ferramentas que ajudem no processo decisório das tipologias construtivas. A maioria das ferramentas de quantificação de CO₂ se baseia no banco de dados de emissões consolidado no território brasileiro por Tavares (2006) e, internacionalmente, por Hammond e Jones (2011), aplicado ao quantitativo de materiais requeridos para a construção da edificação. As ferramentas de quantificação de carbono e energia embutida das edificações se utilizam de planilhas do Excel, de programação BIM, do *software* Cambridge Engineering Selector CES Selector, as quais, em sua maioria, buscam a Análise do Ciclo de Vida de Emissões de CO₂ (ACVCO₂). A Tabela 2 apresenta uma síntese dos sistemas construtivos encontrados nessa revisão sistemática e o total de emissões de CO₂ por unidade de área da edificação, além de demonstrar em qual fase do ciclo de vida o sistema construtivo foi analisado.

Observa-se que as vedações com o menor valor de emissão são para edificações típicas compostas de alvenaria, e as esquadrias encontradas nesta pesquisa foram de 47,62, enquanto para Hammond e Jones (2008), tem-se 403 kgCO₂/m².

Dessa maneira, ao comparar as emissões em kgCO₂/m² do Reino Unido com as brasileiras, percebe-se que algumas edificações ficaram abaixo da média de 435 kgCO₂/m², por exemplo, a alvenaria de bloco estrutural de concreto, alvenaria de bloco estrutural cerâmico, sistema construtivo em *wood frame*, sistema construtivo em OSB, cobertura verde, cobertura em telhas de fibrocimento, cobertura em telhas cerâmicas, parede de concreto e outras tipologias, conforme apresentado na Tabela 2. Todavia, algumas tipologias de edificações, as quais consideram todo o ciclo de vida, nas fases pré-operacional, operacional e pós-operacional, superaram a média britânica, por exemplo, alvenaria em bloco de concreto, com cobertura em telha sanduíche de aço e EPS, estrutura de madeira e fundação em concreto (12.069,04 kgCO₂/m²).

Além disso, como medidas mitigadoras das emissões de carbono da construção civil, destaca-se estudo de concretos verdes, os quais promovem a pegada de carbono, como apresentado no estudo de Araújo *et al.* (2013), o qual apresenta que o concreto verde é um dos maiores coletores de carbono na indústria da construção civil.

Tabela 2 – Síntese das emissões por tipologia construtiva e por unidade de área construída

SISTEMA CONSTRUTIVO	INDICADOR (kgCO ₂ /M ²)	FASE DO CICLO DE VIDA			
		PRÉ- OPERACIONAL	PRÉ- OPERACIONAL DE TRANSPORTE	OPE- RACIONAL	PÓS- OPERACIONAL
Alvenaria de bloco estrutural de concreto	22,8		x		
Alvenaria de bloco estrutural de bloco cerâmico	24,5		x		
Alvenaria em Light Steel Frame	1520	x		x	x
Alvenaria em blocos cerâmicos; estrutura de concreto armado	1560	x		x	x
Alvenaria em <i>wood frame</i> de madeira maciça, enrijecida por painéis OSB ou <i>fiberboard</i> (externo). Alvenaria em <i>drywall</i> (interno)	88,23	x			
Estrutura de concreto armado com blocos cerâmicos	610,0	x		x	x
Alvenaria estrutural com blocos de concreto	600,0	x		x	x
Steel frame com OSB	560	x		x	x
Alvenaria em parede de concreto	570	x		x	x
Alvenaria estrutural de bloco cerâmico	1.549	x			
Alvenaria estrutural de bloco de concreto	299	x			
Parede de concreto	294	x			
Alvenaria de bloco cerâmico, cimento, concreto usinado, areia e brita	1.402	x			
Alvenaria com a utilização de bloco de solo cimento	1.215	x			
Alvenaria em bloco de concreto	1.446	x			
Estrutura em Concreto armado, alvenaria em tijolo cerâmico e revestimentos argamassados	159,2	x			

Vedações Verticais

	SISTEMA CONSTRUTIVO	INDICADOR (kgCO ₂ /m ²)	FASE DO CICLO DE VIDA			
			PRÉ-OPERACIONAL	PRÉ-OPERACIONAL DE TRANSPORTE	OPERACIONAL	PÓS-OPERACIONAL
Sistemas construtivos, pisos, cobertura	Alvenaria de bloco de concreto, piso cerâmico e em tacos de madeira, cobertura de telha cerâmica, janelas e portas de madeira	152,2	x		x	x
	Alvenaria de bloco cerâmico vazado, piso cerâmico e em tacos de madeira, cobertura de telha cerâmica, janelas e portas de alumínio	150,3	x		x	x
	Alvenaria de bloco cerâmico vazado, piso cerâmico, cobertura de telha cerâmica, janelas e portas de madeira	149,1	x		x	x
	Alvenaria de bloco cerâmico vazado, piso cerâmico e em tacos de madeira, cobertura de telha cerâmica, janelas e portas de madeira	142,1	x		x	x
	Alvenaria de bloco cerâmico vazado, piso cerâmico e em tacos de madeira, cobertura de telha de concreto, janelas e portas de madeira	131,5	x		x	x
	Alvenaria em bloco cerâmico, aço, cimento, concreto usinado, areia e brita	181,65	x			
	Alvenaria de tijolos e concreto armado, com forro de PVC, as portas de madeira e as esquadrias em ferro.	176,5	x			
	Sistema construtivo em painéis portantes de madeira compensada e de reflorestamento, em um sistema <i>wood light frame</i>	47,62	x			
	Estrutura em concreto armado e alvenaria em blocos cerâmicos	572,25	x			
	Alvenaria em <i>wood frame</i> , de madeira serradas autoclavadas e OSB, revestida com placa cimentícia, e chapas de gesso acartonado. Manta de lã de vidro (parede geminada). Cobertura em estrutura metálica ou em madeira, telhas cerâmicas, forro em PVC e manta de lã de vidro.	110,83	x			

SISTEMA CONSTRUTIVO	INDICADOR (KGCO ₂ /M ²)	FASE DO CICLO DE VIDA				
		PRÉ- OPERACIONAL	PRÉ- OPERACIONAL DE TRANSPORTE	OPE- RACIONAL	PÓS- OPERACIONAL	
Sistema construtivo, fundação e cobertura	Fundação em radier. Alvenaria em Wood frame composta por: 1) gesso acartonado, 2) estrutura em pinus tratamento com CCA, 3) OSB, 4) membrana hidrófuga e 5) placa cimentícia, 6) placas de gesso acartonado. A cobertura em treliças pré-fabricadas de madeira pinus telha cerâmica. As treliças do oitão vedadas com OSB, membrana hidrófuga e placa cimentícia.	928,6	x		x	x
	Alvenaria tijolo cerâmico maciço, cobertura em telha cerâmica e estrutura em madeira, e fundação em blocos de granito	8266,75	x			x
	Alvenaria com a utilização de bloco de solo cimento, cobertura com telha ecológica feita de papel reciclado e madeira e fundação em bloco de granito	8357,32	x			x
	Alvenaria em bloco de concreto, com cobertura em telha sanduiche de aço e EPS, estrutura de madeira e fundação em concreto	12069,04	x			x
	Fundação e estrutura em concreto armado, vedações em bloco cerâmico, cobertura de telha cerâmica e de fibrocimento e esquadrias em pele de vidro e madeira cedro	205,04	x			x
	Cobertura verde	57,76				x
Cobertura	Cobertura em telhas cerâmicas	106,27	x			x
	Cobertura em telhas de fibrocimento	95,21	x			x
	Cobertura verde	46,68	x			x
	Cobertura em telhas cerâmicas	73,89	x			x
	Cobertura em telhas de fibrocimento	64,91	x			x

Fonte: Elaborado pelos autores deste artigo (2024)

4 Considerações Finais

Constatou-se a existência de várias metodologias para estimativa da emissão de carbono e a energia embutida de uma edificação, ainda em fase projetual, que podem realizar o comparativo entre os tipos de construções, sejam elas convencionais ou inovadoras.

Diante do exposto, é perceptível a análise dos indicadores de emissões de carbono em todo o ciclo de vida das edificações brasileiras encontradas nesta revisão sistemática, construindo um panorama brasileiro sintético sobre as distintas tipologias construtivas. Há diversas ferramentas e métodos quantitativos de análise do carbono incorporado e da energia embutida das edificações, na base de dados nacional, as quais são visivelmente prejudiciais à sociedade. Percebe-se que os trabalhos analisados se destinam apenas a uma cidade específica e a tipologias construtivas específicas, não generalizando os estudos para todos os municípios brasileiros. Destaca-se, também, a importância da influência sociopolítica para a divulgação desses estudos no contexto da indústria e do comércio, para que induzam os profissionais a utilizar a análise de carbono incorporado e energia embutida no processo de anteprojeto e projeto das edificações, com o intuito de escolher os sistemas construtivos mais sustentáveis.

5 Perspectivas Futuras

Muito embora existam diversas metodologias para o cálculo das emissões de carbono das edificações, poucas são acessíveis e de fácil entendimento para o profissional da construção civil, uma vez que a maioria dessas metodologias necessita de conhecimento especializado, dificultando o uso dessas ferramentas. Então, como perspectiva para trabalhos futuros, vislumbra-se a disponibilização de recursos mais interativos e amigáveis aos profissionais, com o propósito de divulgar esses estudos proporcionando transferência de conhecimento da academia para o mercado de trabalho, abordando a problemática das emissões de carbono na etapa de decisão projetual e de planejamento de projetos de edificações.

Ademais, como exposto anteriormente, os meios de cálculo de emissões dos materiais da construção civil necessitam ser mais abrangentes, com uma ampla diversidade de tipologias construtivas e de localidades, visto que a maioria dos estudos destacados neste trabalho são realizados para uma localização específica e também para sistemas construtivos específicos, não abrangendo tipologias construtivas, como estruturas de concreto verde, taipa, tijolo ecológico, entre outros.

Referências

- ARAUJO, M.; SATTLER, M. A. Contribuição do BIM no processo de quantificação de CO₂ no projeto de edificações: estudo de caso com o software Autodesk Revit. **Paranoá: Cadernos de Arquitetura e Urbanismo**, v. 22, p. 102-111, 2018.
- ARAUJO, V. R. B. S. DE *et al.* Estudo de Prospecção do Concreto Verde. **Cadernos de Prospecção**, Salvador, v. 6, n. 2, p. 106-106, 2013.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- AZEVEDO, N. C. de. **Avaliação do ciclo de vida energético e de Co₂ através da modelagem da informação da construção (BIM) e simulação termo energética de uma habitação unifamiliar em wood frame**. 2019. 157f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.
- BALDESSAR, S. M. N. **Telhado verde e sua contribuição na redução da vazão da água pluvial escoada**. 2012. 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.
- BARLETTA, I. F. **Soluções construtivas para edificações - proposta de método de escolha baseado nos quesitos CO₂ embutido e custo**. 2022. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2022.
- BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovação. **Projeto do MCTI quer descarbonizar construção civil por meio de edifícios com zero emissão de CO₂**. Publicado em 27/12/2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2023/12/projeto-do-mcti-quer-descarbonizar-construcao-civil-por-meio-de-edificios-com-zero-emissao-de-co2>. Acesso em: 2 abr. 2024.
- CALDAS, L. R. **Avaliação do ciclo de vida energético e de emissões de CO₂ de uma edificação habitacional unifamiliar de light steel framing**. 2016. 174f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016.
- CALDAS, L. R.; SPOSTO, R. M. Emissões de CO₂ referentes ao transporte de materiais de construção no Brasil: estudo comparativo entre blocos estruturais cerâmicos e de concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 91-108, out.-dez. 2017.
- CUNHA, I. B. da. **Quantificação das emissões de CO₂ na construção de unidades residenciais unifamiliares com diferentes materiais**. 2016. 136f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

- DEEKE, V. **Materiais convencionais utilizados na construção civil e emissão de CO₂ estudo de caso de um edifício educacional da UTFPR**. 2009. 221f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JÚNIOR, J. A. V. **Design Science Research: Método de Pesquisa para Avanço da Ciência e Tecnologia**. Porto Alegre: Bookman, 2014. 204p.
- FREITAS JR., J. D. A. *et al.* Estudo da aplicação de coberturas verdes no objetivo de se construir edifícios neutros em carbono. **Holos Environment**, v. 17, n. 1, p. 35, 2017.
- HAMMOND, G. P.; JONES, C. I. Embodied energy and carbon in construction materials. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Energy**, v. 161, n. 2, p. 87-98, 2008. ISSN 1751-4223.
- HAMMOND, G. P.; JONES, C. I. **Embodied Carbon: the concealed impact of residential construction**. New York: Springer. 2009. DOI: 10.1007/978-1-4419-1017-2_23.
- HAMMOND, G. P.; JONES, C. I. **Inventory of Carbon & Energy (ICE) Version 2.0**. Bath: University of Bath, 2011.
- IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY; IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY; UN – UNITED NATIONS CLIMATE CHANGE HIGH-LEVEL CHAMPIONS. **The Breakthrough Agenda Report 2022: Accelerating Sector Transitions Through Stronger International Collaboration**. Organisation for Economic Cooperation and Development. IEA, Paris, 2022. Disponível em: https://www.oecd-ilibrary.org/energy/the-breakthroughagenda-report-2022_692cdb6b-en. Acesso em: 2 abr. 2024.
- IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY; IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY; UN – UNITED NATIONS CLIMATE CHANGE HIGH-LEVEL CHAMPIONS. **The Breakthrough Agenda Report 2023**. IEA, Paris, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/breakthrough-agenda-report-2023>. Acesso em: 2 abr. 2024.
- INVIDIATA, A. **Método de avaliação multicritério de estratégias de projeto de edificações mais sustentáveis**. 2017. 333f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.
- KOZLOSKI, C. L. **Emissão de CO₂ de materiais de construção civil no Brasil: estimativas na etapa projetual de edificações**. 2020. 273f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020.
- LOBO, F. H. R. **Metodologia de inventário de emissão equivalente de dióxido de carbono por meio de análise energética de composição de serviço de obras pelo ciclo de vida de edificações**. 2010. 1.000f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- MADEIRA, J. G. da S. **Avaliação do ciclo de vida energético e desempenho da envoltória mediante ações de retrofit em edificação pública escolar**. 2019. 195f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019.
- MARCOS, M. H. C. **Análise da emissão de CO₂ na fase pré-operacional da construção de habitações de interesse social através da utilização de uma ferramenta CAD-BIM**. 2009. 130f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- MORANDI, M. I. W. M.; CAMARGO, L. F. R. Revisão sistemática da literatura. *In*: DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JÚNIOR, J. A. V. **Design Science Research: Método de Pesquisa para Avanço da Ciência e Tecnologia**. Porto Alegre: Bookman, 2015. Cap. 6. p. 141-171.
- OLIVEIRA, E. de. **Contribuição para análise do ciclo de vida no ambiente construído visando a energia e CO₂ embutidos no sistema construtivo wood frame**. 2016. 125f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.
- OLIVEIRA, E. W. N. de. **Telhados verdes para habitações de interesse social: retenção das águas pluviais e conforto térmico**. 2009. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Estadual do Rio de Janeiro, 2009.
- PBE EDIFICA. **Nova INI**. [2025]. Disponível em: <https://www.pbeedifica.com.br/nova-ini>. Acesso em: 9 out. 2025.
- PEREIRA, M. F. B. **Conteúdo energético e emissões de CO₂ em coberturas verdes, de telha cerâmica e de fibrocimento: estudo de caso**. 2014. 148f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.
- PIVA, G. O. **Sustentabilidade na construção civil: avaliação do ciclo de vida de energia e de emissões de CO₂ em edificação histórica de origem portuguesa e contemporânea**. 2019. 146f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2019.
- POSTAY, R. **Correlação entre compactidade, energia incorporada e emissões de CO₂, em projetos de habitação de interesse social**. 2015. 124f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2015.

PROGRAMA BRASILEIRO GHG PROTOCOL.
Especificações do Programa Brasileiro GHG Protocol: contabilização, quantificação e publicação de inventários corporativos de emissões de gases de efeito estufa. 2. ed. [S.l.]: Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável (CEBDS), 2010.

SAMPAIO, R. F.; MANCINI, M. C. Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. **Revista Brasileira de Fisioterapia**, São Carlos, v. 11, n. 11, p. 83-89, 2007. ISSN 1413-3555.

SANTORO, J. F.; KRIPKA, M. Determinação das emissões de dióxido de carbono das matérias primas do concreto produzido na região norte do Rio Grande do Sul. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 2, p. 35-49, 2016.

SILVA, A. M. A. *et al.* Estimates of CO₂ emission in a building in the municipality of Garanhuns – Pernambuco. **RGSA: Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 18, n. 2, e04196-11, 2024.

SILVA, B.V. **Construção de ferramenta para avaliação do ciclo de vida de edificações.** 2012. 146 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

SILVA, E. S. E. **Inventário de gases de efeito estufa na etapa de construção de edificações residenciais multifamiliares na região da Grande Florianópolis (SC).** 2014. 230f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

SILVA, R. F. da. **Avaliação do ciclo de vida energético e de emissões de CO₂ de sistemas de vedações para uma habitação rural de interesse social.** 2017. 131f. Dissertação – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Paraná, 2017.

SPERB, M. R. **Avaliação de tipologias habitacionais a partir da caracterização de impactos ambientais relacionados a materiais de construção.** 2000. 159f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

STACHERA JUNIOR, T. **Avaliação de emissões de CO₂ na construção civil:** um estudo de caso da habitação de interesse social no Paraná. 2006. 137f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

TAVARES, S. F. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras.** Florianópolis, 2006. 225p. Tese (Doutorado em Tecnologia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

TEODORO, M. I. T. de M. **Energia embutida na construção de edificações no Brasil:** contribuições para o desenvolvimento de políticas públicas a partir de um estudo de caso em Mato Grosso do Sul. 2017. 234f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Global Status Report for Buildings and Construction:** Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector. Nairobi, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/45095>. Acesso em: 2 abr. 2024.

Sobre os Autores

Samira Gomes Alencar

E-mail: samiragmes@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8376-1627>

Bacharela em Engenharia Civil.

Av. Fernando Corrêa da Costa, n. 2.367, Boa Esperança, Cuiabá, MT. CEP: 78060-900.

Luciane Cleonice Durante

E-mail: luciane.durante@ufmt.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4998-4587>

Doutora em Física Ambiental.

Av. Fernando Corrêa da Costa, n. 2.367, Boa Esperança, Cuiabá, MT. CEP: 78060-900

Luciana Pelaes Mascaro

E-mail: mascaro.luciana@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9252-9555>

Doutora em Arquitetura e Urbanismo.

Av. Fernando Corrêa da Costa, n. 2.367, Boa Esperança, Cuiabá, MT. CEP: 78060-900.

Ivan Julio Apolonio Callejas

E-mail: ivancallejas1973@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7877-7029>

Ph.D em Arquitetura e Urbanismo.

Av. Fernando Corrêa da Costa, n. 2.367, Boa Esperança, Cuiabá, MT. CEP: 78060-900.