



UFRJ



Ferramenta digital simplificada para cálculo de indicadores de emissão de CO₂ de residências unifamiliares no Brasil

Ana Carolina Rocha Tostes de Oliveira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências em Arquitetura, Linha de pesquisa Arquitetura, Projeto e Sustentabilidade.

Orientador: Thiago Melo Grabois

Rio de Janeiro

Fevereiro de 2025



UFRJ



Ferramenta digital simplificada para cálculo de indicadores de emissão de CO₂ de residências unifamiliares no Brasil

Ana Carolina Rocha Tostes de Oliveira

Orientador: Thiago Melo Grabois

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências em Arquitetura, Linha de pesquisa Arquitetura, Projeto e Sustentabilidade.

Aprovada por:

Prof. Dr. Thiago Melo Grabois (Universidade Federal do Rio de Janeiro)

Prof. Dr. Lucas Rosse Caldas (Universidade Federal do Rio de Janeiro)

Prof. Dr. Katia Regina Garcia Punhagui (Universidade Federal da Integração Latino-Americana)

Rio de Janeiro

Fevereiro de 2025

CIP - Catalogação na Publicação

048f Oliveira, Ana Carolina Rocha Tostes de
 Ferramenta digital simplificada para cálculo de
 indicadores de emissão de CO2 de residências
 unifamiliares no Brasil / Ana Carolina Rocha Tostes
 de Oliveira. -- Rio de Janeiro, 2025.
 172 f.

 Orientador: Thiago Melo Grabois.
 Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do
 Rio de Janeiro, Faculdade de Arquitetura e
 Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura,
 2025.

 1. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). 2. Emissão
 de CO2. 3. Ferramenta digital. 4. Indicadores de
 impacto ambiental. I. Grabois, Thiago Melo, orient.
 II. Título.



UFRJ



Dedicado à memória de Thiago Tostes de Oliveira, meu amado pai.



UFRJ



AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, que sabe de todas as coisas.

Agradeço aos meus pais, Kelly e Thiago, pelo apoio incondicional e pelas oportunidades que me deram ao longo de todos esses anos dedicados aos estudos. Ainda, por me ensinarem o valor do conhecimento, da dedicação e da coragem.

À minha irmã, Alana, que amo tanto. Aos demais integrantes da minha extensa rede de apoio familiar, incluindo minhas avós Sandra e Auxiliadora, minhas tias Daniela e Andrea, meu avô Dalmir e meu suporte emocional canino, Josh.

Aos meus amigos, por me ajudarem a superar os desafios e por estarem lá para comemorar minhas conquistas. Sou especialmente grata à Luísa, Milena, Laura, Ísis, Nicole, João Victor e Guilherme, pelas amizades à prova de tempo.

Também não posso deixar de expressar minha sincera gratidão a todos os colegas de *Alma Mater* que fizeram parte dessa trajetória de alguma forma. À Larissa, com quem divido tantas memórias em lados diferentes do mundo. À Thaís, que me deu tantos conselhos e caronas. À Silvana e Maria Antonia, pelo companheirismo e sinceras risadas. Aos demais amigos de graduação, fundamentais na minha caminhada: Nathália, Leandro, Eduardo, Marcela, Beatriz, Carolina, Luísa, Inah, Monique, Arthur, Litza e Júlia. Aos colegas e amigos de projetos extracurriculares, especialmente à Ingrid e Enzo, e aos de laboratório ou sala de aula – obrigada Joyce, Yassin, Bárbara, César, Cinthya, Fabrício, Guilherme, João, Nicole, Patrícia, Stefani, Kevin, Beatriz, Rayana, Eduarda, Samara, Mirela, Pedro e Philipe.



UFRJ



À minha amiga Nada, que no meio de um intercâmbio e falando outra língua, foi uma das primeiras pessoas que me incentivaram a fazer um mestrado. À Beatrice e Valentina, por terem apoiado.

Sou muito grata também a todos os professores e professoras que me formaram desde o início da vida, pois muitos dos meus valores e interesses vem também deles. Em particular, agradeço ao meu orientador, Thiago Grabois, pelo inimaginável suporte, compreensão, confiança e por ser um exemplo. Aos professores Lucas Caldas, Marcos Silvosso e Alexandre Landesmann, e aos técnicos Osvaldo Santiago e Paulo, cujos ensinamentos contribuíram de maneira especial para a minha formação durante o mestrado. Agradeço às professoras Reila Velasco e Luciana Figueiredo, por nunca terem hesitado em me ajudar e por serem inspiração dentro de um meio ainda masculino.

Agradeço também ao PROARQ e à CAPES, pela oportunidade e pelo apoio financeiro, sem o qual não poderia ter feito o mestrado.

Por fim, sou grata a mim mesma, por ter sempre a coragem de continuar.



UFRJ



RESUMO

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é um método que pode colaborar para a mitigação de gases de efeito estufa (GEE) na indústria da construção. Com a crescente digitalização da arquitetura, a criação de novas abordagens metodológicas para aplicação da ACV torna possível responder a lacunas de conhecimento como a falta de estudo de casos em países em desenvolvimento, como o Brasil. Nesse contexto, o presente trabalho propõe indicadores de emissão de CO₂ para residências unifamiliares no Brasil, baseados em estudos de caso em sistemas construtivos de concreto armado, alvenaria estrutural, *CLT*, *wood frame*, mata-junta e macho e fêmea. Especificamente, foram estimadas as emissões relativas às fases de produção no ciclo de vida, utilizando apenas dados brasileiros de consumo de materiais e de fator de emissão por material. Em seguida, os resultados foram compilados em indicadores por sistema construtivo, e foram utilizados no desenvolvimento de uma ferramenta simplificada, digital e gratuita que calcula as emissões de CO₂ de projetos com base em poucos dados de entrada. Em síntese, o trabalho contribui com uma abordagem simplificada para estimar o impacto de projetos em estágio iniciais, com foco em facilitar a aplicação de ACV para estudantes do campo da arquitetura e construção e leigos em ACV. Os resultados encontrados demonstram a relevância da mitigação de impactos na escala dos materiais de construção, e reforçam a necessidade da coleta de dados primários em grande escala, junto aos fabricantes de materiais no Brasil.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida (ACV); Emissão de CO₂; Ferramenta digital; Indicadores de impacto ambiental.



UFRJ



ABSTRACT

Life Cycle Assessment (LCA) is a method that can be used to mitigate greenhouse gas emissions (GHG) in the construction industry. Wit the increasing digitalization of architecture, creating new methodological approaches for practical applications of LCA makes it possible to address knowledge gaps such as the lack of case studies in developing countries, like Brazil. In this context, this paper proposes CO₂ emissions indicators for single-family homes in Brazil, based on case studies in conventional construction systems, namely reinforced concrete, structural masonry, cross laminated timber, wood frame, tongue and groove and staggered joint. Specifically, emissions related to the life cycle's production phase were estimated, using only Brazilian data on material consumption and emission factor by material. The results were then compiled into indicators by construction system, and were used in the development of a simplified, digital and free tool that calculates CO₂ emissions of projects based on few input data. In summary, the work contributes with a simplified approach to estimate the impact of early-stage projects, with a focus on facilitating the application of LCA for students in the field of architecture and construction and for laypeople in this field. The results found demonstrate the relevance of impact mitigation at the scale of construction materials and reinforce the need for large-scale primary data collection from materials manufacturers in Brazil.

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA); CO₂ emission; Digital tool; Environmental impact indicators.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Fases do ciclo de vida de edificações.	33
Figura 2 — Fluxograma das etapas e critérios de pesquisa da RSL.....	42
Figura 3 — Número de artigos por periódico.	44
Figura 4 — Diagrama das etapas metodológicas.	71
Figura 5 — Planta baixa do projeto-padrão R1B.	73
Figura 6 — Planta baixa do projeto-padrão do PMCMV.	74
Figura 7 — Planta baixa do projeto-padrão Mãos à Obra.	75
Figura 8 — Plantas baixas dos cenários alternativos A a G.	80
Figura 9 – Abordagem metodológica para o desenvolvimento de ferramentas de ACV.	102
Figura 10 – Fluxograma dos diferentes cenários considerados para a definição dos indicadores de emissão de CO ₂ adotados na ferramenta simplificada proposta.	105
Figura 11 – Emissões de CO ₂ por cada insumo necessário para construir uma casa brasileira do tipo R1-B, em kgCO ₂ /m ² de área construída.....	114
Figura 12 – Impacto percentual por insumo em cenários (a) de consumo mínimo e emissões mínimas, (b) de consumo médio e emissões médias e (c) de consumo máximo e emissões máximas, no modelo residencial R1-B.	116
Figura 13 – Impacto percentual por insumo em um cenário de otimização do consumo de materiais cimentícios, para um empreendimento de 400 unidades de residências modelo R1-B.....	119
Figura 14 – Emissões de CO ₂ por cada insumo necessário para construir uma casa típica brasileira do tipo PMCMV, em kgCO ₂ /m ² de área construída.....	121
Figura 15 – Impacto percentual por insumo em cenários de (a) emissões mínimas, (b) emissões médias e (c) emissões máximas, no modelo residencial PMCMV.	122

Figura 16 – Emissões de CO ₂ por cada insumo necessário para construir uma casa brasileira do tipo MAB em sistema S2, em kgCO ₂ /m ² de área construída.....	125
Figura 17 – Impacto percentual por insumo em cenários (a) de consumo mínimo e emissões mínimas, (b) de consumo médio e emissões médias e (c) de consumo máximo e emissões máximas, no modelo residencial MAB em sistema S2.	126
Figura 18 – Emissões de CO ₂ por cada insumo necessário para construir uma casa brasileira do tipo MAB em sistema S1, em kgCO ₂ /m ² de área construída.....	129
Figura 19 – Emissões de CO ₂ para a construção de uma casa de 50,18 m ² em diferentes sistemas construtivos em madeira no Brasil, em kgCO ₂	132
Figura 20 – Emissões de CO ₂ para cada modelo residencial em diferentes sistemas baseados em madeira, em kgCO ₂	133
Figura 21 – Variação entre os indicadores de emissão máxima e mínima de CO ₂ , por sistema construtivo.....	135
Figura 22 – Elementos interativos da interface da ferramenta Calculadora de Emissões de Carbono (ferramenta-simplificada.vercel.app).....	137
Figura 23 – Imagem extraída da ferramenta Calculadora de Emissões de Carbono (ferramenta-simplificada.vercel.app). Exemplo de aplicação da ferramenta para uma edificação de 50,22 m ² adotando o sistema S2 (Alvenaria estrutural com blocos de concreto).....	138
Figura 24 – Imagem extraída da ferramenta Calculadora de Emissões de Carbono (ferramenta-simplificada.vercel.app). Exemplo de aplicação da ferramenta para uma edificação de 49 m ² adotando o sistema S5 (CLT).	139
Figura 25 – Imagem extraída da ferramenta Calculadora de Emissões de Carbono (ferramenta-simplificada.vercel.app). Exemplo de aplicação da ferramenta para uma edificação de 50 m ² adotando o sistema S3 (mata-junta).	140
Figura 26 – Imagem extraída da ferramenta Calculadora de Emissões de Carbono (ferramenta-simplificada.vercel.app). Aplicação da ferramenta no caso Vivenda dos Girassóis, em sistema S1.....	141

Figura 27 – Imagem extraída da ferramenta Calculadora de Emissões de Carbono (ferramenta-simplificada.vercel.app). Aplicação da ferramenta no caso Vivenda dos Girassóis, em sistema S2.....	142
Figura 28 – Imagem extraída da ferramenta Calculadora de Emissões de Carbono (ferramenta-simplificada.vercel.app). Aplicação da ferramenta no caso Vivenda dos Girassóis, em sistema S5.....	143
Figura 29 – Emissões de CO ₂ em modelos de casas brasileiras em sistemas baseados em alvenaria, totais e por metro quadrado construído.	146
Figura 30 – Emissões, em kgCO ₂ /m ² construído, em casas de concreto armado com vedação em alvenaria cerâmica (sistema S1).....	148
Figura 31 – Níveis de emissão total, em kgCO ₂ /m ² construído, para casas de alvenaria estrutural (por autor). A coluna “Indicador de emissão para S2” faz referência aos resultados deste trabalho, apresentados na Tabela 25.	152

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Bases de dados para DAP, por país, no Brasil e na Europa.	48
Tabela 2 — Custos dos programas computacionais para ACV, considerando licenças com renovação anual.....	50
Tabela 3 — Uma seleção de ferramentas de ACV existentes e seus recursos.	51
Tabela 4 — Projetos representativos de uma casa típica brasileira.....	76
Tabela 5 — Definições adotadas para os sistemas construtivos em madeira.	78
Tabela 6 — Quadro resumo de áreas para os modelos residenciais em madeira.	84
Tabela 7 — Lista de insumos considerados para casas R1-B, PMCMV e MAB, nos sistemas S1 e S2.....	85
Tabela 8 — Consumo de diferentes materiais para residências unifamiliares típicas brasileiras.	88
Tabela 9 — Consumo de diferentes materiais para residências unifamiliares típicas brasileiras no modelo PMCMV.	89
Tabela 10 — Consumo de diferentes materiais para residências unifamiliares brasileiras no modelo MAB em sistema S2.....	90
Tabela 11 — Consumo de diferentes materiais para residências unifamiliares brasileiras no modelo MAB em sistema S1.....	90
Tabela 12 — Consumo de diferentes materiais para residências unifamiliares brasileiras em <i>wood frame</i> , por metro quadrado de parede construída.....	91
Tabela 13 — Consumo de diferentes materiais para residências unifamiliares brasileiras em CLT, por metro quadrado de parede construída.	92
Tabela 14 — Consumo de madeira para residências unifamiliares brasileiras construídas em sistemas baseados em madeira.	92
Tabela 15 — Consumo de materiais para a alvenaria na construção de uma residência unifamiliar brasileira em sistema mata-junta ou macho e fêmea.	94

Tabela 16 — Emissão de CO ₂ para diferentes materiais utilizados em residências unifamiliares brasileiras baseadas em alvenaria, em kgCO ₂ /unidade funcional variável.....	98
Tabela 17 — Fatores de conversão adotados para diferentes materiais utilizados em residências unifamiliares brasileiras baseadas em alvenaria e os respectivos indicadores de emissão de CO ₂ , em kgCO ₂ /kg de material.....	99
Tabela 18 — Correlação adotada entre insumos especificados por projeto e insumos do catálogo Sidac, para cada modelo residencial baseado em alvenaria (R1-B, PMCMV e MAB).....	101
Tabela 19 — Critérios para a construção da ferramenta simplificada.....	103
Tabela 20 – Emissões de CO ₂ para cada insumo necessário para construir uma casa brasileira no modelo R1-B, em kgCO ₂ por metro quadrado de área construída.....	113
Tabela 21 – Emissões de CO ₂ para cada insumo necessário para construir uma casa brasileira no modelo PMCMV, em kgCO ₂ por metro quadrado de área construída.....	120
Tabela 22 – Emissões de CO ₂ para cada insumo necessário para construir uma casa brasileira no modelo MAB em sistema S2, em kgCO ₂ por metro quadrado de área construída.	124
Tabela 23 – Emissões de CO ₂ para cada insumo necessário para construir uma casa brasileira no modelo MAB em sistema S1, em kgCO ₂ por metro quadrado de área construída.	129
Tabela 24 – Emissões de CO ₂ para cenários em mata-junta e macho e fêmea, em kgCO ₂ por metro quadrado de área construída.....	130
Tabela 25 — Indicadores de emissão por cenário, em kgCO ₂ /m ²	134
Tabela 26 – Emissões para o estudo de caso do Vivenda dos Girassóis, calculados pela ferramenta simplificada, em tonCO ₂	143

Tabela 27 – Fatores de emissões de CO ₂ para argamassas, em kgCO ₂ /m ² , para Orlandini e Punhagui (2024), em comparação com o presente trabalho.....	149
Tabela 28 – Fatores de emissões de CO ₂ por insumo, para Costa (2012) e para este estudo com base no Sidac (2022).....	150
Tabela 29 – Fatores de perda por insumo em Costa (2012) e Carvalho (2018)..	151

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	16
1.1 OBJETIVOS E RESUMO DO MÉTODO	19
1.2 RECORTE ADOTADO.....	20
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	21
REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO	23
REFERENCIAL TEÓRICO	28
2.1 FERRAMENTAS PARA SUSTENTABILIDADE NA ARQUITETURA.....	29
2.1.1 Avaliação do Ciclo de Vida	33
2.1.2 Ferramentas complementares à ACV.....	36
2.2 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A CONTRIBUIÇÃO DA ACV	39
2.2.1 Revisão sistemática da literatura – A contribuição da ACV para os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS).....	41
2.3 DIFICULDADES DA APLICAÇÃO DA ACV NO SETOR DA CONSTRUÇÃO	48
REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO	54
METODOLOGIA	70
3.1 DELIMITAÇÃO DOS CENÁRIOS DE ESTUDO	71
3.1.1 Identificação das características de uma casa típica brasileira	71
3.1.2 Definição de cenários alternativos e das limitações do estudo	76
3.1.3 Limitações do estudo.....	84
3.1.4 Levantamento de dados sobre consumo dos materiais.....	85
3.2 APLICAÇÃO DA ACV PARA ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE CO ₂	94

3.2.1 Definição do objetivo e escopo.....	95
3.2.2 Fronteira do <i>sistema</i>	95
3.2.3 Categoria de impacto.....	95
3.2.4 Requisitos de dados.....	96
3.2.5 Levantamento dos dados sobre emissões de CO ₂ , limitações e suposições do estudo	97
3.3 ELABORAÇÃO DE UMA FERRAMENTA SIMPLIFICADA PARA ESTIMATIVA DE CO ₂ EMITIDO PARA A CONSTRUÇÃO DE CASAS NO BRASIL	101
REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO	106
RESULTADOS.....	113
4.1 MODELO RESIDENCIAL R1-B.....	113
4.2 MODELO RESIDENCIAL PMCMV.....	120
4.3 MODELO RESIDENCIAL MAB	124
4.4 CENÁRIOS ALTERNATIVOS EM MADEIRA	130
4.5 INDICADORES NUMÉRICOS DE IMPACTO AMBIENTAL PARA A FERRAMENTA SIMPLIFICADA.....	134
4.6 FERRAMENTA SIMPLIFICADA PARA CÁLCULO DE EMISSÕES DE CO ₂	136
REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO	144
DISCUSSÃO.....	146
REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO	154
CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	155
APÊNDICE A.....	158

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O impacto das mudanças climáticas no ambiente construído é um dos maiores desafios do século (Mitchell *et al.*, 2016, Aktürk, 2022), que afeta ecossistemas, o ambiente e a sociedade como um todo (Dong *et al.*, 2023; Bamdad *et al.*, 2021). A relação entre o setor da construção e as mudanças climáticas é complexa e mutuamente nociva: enquanto a construção civil é responsável por aproximadamente 37% das emissões de gases de efeito estufa globais (UNEP, 2023), as consequências do aquecimento global para as edificações existentes são preocupantes. Estima-se que a temperatura média da superfície terrestre tenha aumentado 1,09°C desde as décadas pré-industriais (1850-1900) e, embora a meta do Acordo de Paris (2016) tenha sido manter o aquecimento global entre 1,5°C e 2°C, o Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC) categorizou essa possibilidade como baixa ou muito baixa.

Diante deste cenário, o Brasil se destaca como o país mais populoso e o maior emissor de GEE da América Latina. Temos um nível de emissão per capita semelhante ao da União Europeia e menor que a média do G20¹ (UNEP, 2023), e que tem sido reduzida nos últimos anos. Apesar disso, ainda há um longo caminho a ser percorrido rumo aos objetivos do Acordo de Paris. É necessário que os países cumpram mais do que prometeram, e reduzam as emissões previstas para 2030 em 28% para atingir os 2°C do Acordo de Paris e 42% para os 1,5°C. Destacam-se entre os gases de efeito estufa (GEE) o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O), que perduram na atmosfera por até mil, 10 e 120 anos, respectivamente.

¹ G20 é um grupo de países que reúne as maiores economias do mundo, sendo composto por 19 países e dois órgãos regionais. Cerca de 85% do Produto Interno Bruto (PIB), 75% do comércio e dois terços da população mundial são representados por esse grupo. Fonte: <https://g20.gov.br/pt-br/sobre-o-g20>

Em relação à relevância da problemática ambiental com a construção civil, destaca-se que o setor é o que apresenta o maior potencial para economia de energia e redução da emissão de carbono (Kylili, Ilic e Fokaides, 2017), tendo em vista sua influência no consumo mundial de recursos naturais e energia elétrica (Asadollahfardi, Asadi e Karimi, 2015). Assim, torna-se cada vez mais urgente para os profissionais dos campos de arquitetura, engenharia e construção a busca por soluções que evitem ou minimizem os impactos ambientais das edificações.

Nesse contexto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta que apresenta grande potencial no enfrentamento das mudanças climáticas. Essa técnica de gestão ambiental ganhou espaço na construção civil na década de 1990, quando também teve as primeiras normas internacionais dedicadas. É definido pela NBR ISO 14040:2014 como a “compilação e avaliação das entradas, saídas e dos potenciais impactos ambientais de um produto ou processo ao longo do seu ciclo de vida”. No campo da arquitetura, a incorporação da ACV como método, até poucos anos atrás, era considerada uma abordagem complicada e demorada (Dervishaj e Gudmundsson, 2024). Entretanto, estudos mostram que a integração entre ACV e o processo de concepção de projetos de arquitetura afeta positivamente as escolhas projetuais que vislumbram a minimização das emissões de carbono (Naboni, 2017).

Dentre as diversas categorias de impacto que podem ser estudadas em uma avaliação de ciclo de vida, o carbono e energia incorporados são os dois indicadores de maior relevância de estudo quando se fala de mitigação das mudanças climáticas na construção (Belizario-Silva *et al.*, 2023; Proietti *et al.*, 2013; Zabalza *et al.*, 2013). As emissões de CO₂ representam mais de 95% das emissões totais do setor da construção (IPCC, 2023), além de serem prioridade ambiental reconhecida por diversas organizações (UNEP, 2023; WBCSD, 2021; WorldGBC, 2022).

Segundo Jobin e Sié (2011), um dos desafios para a aplicação da ACV é a falta de recursos humanos e financeiros, pois é preciso treinamento e experiência em *softwares* complexos. A abordagem manual, que envolve combinar dados em planilhas, por exemplo, tende a desencorajar os projetistas (Apellániz, Pasanen e Gengnagel, 2021). Tendo em vista que o envolvimento da indústria da construção é essencial para a promoção de tomadas de decisão mais ambientalmente conscientes (Anand e Amor, 2017), alguns estudos (Jobin e Sié, 2011; Lasvaux *et al.*, 2013; Veliyulin, 2021; Di Bari *et al.*, 2022) apontam que uma solução para tornar a ACV mais praticável na indústria, mesmo entre não-especialistas, é trabalhar com softwares descomplicados para o usuário, simples, mas de qualidade. Essa solução precisa ser apoiada em três pilares: um método rigoroso, uma base de dados específica e uma calculadora (Jobin e Sié, 2011).

No Brasil, foi lançada a primeira versão do Sidac, Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção, plataforma que disponibiliza dados brasileiros sobre energia primária e emissão de CO₂ de produtos da construção, no escopo do berço ao portão da fábrica. Por meio do Sidac, é possível consultar e comparar produtos dentro da realidade brasileira, e ter acesso a dados que podem ser utilizados no inventário de uma ACV. A princípio, os dados genéricos disponíveis são baseados na literatura nacional, mas espera-se que em próximas versões esses dados possam ser substituídos por outras iniciativas de coletas de dados do setor (Belizario-Silva *et al.*, 2023). Iniciativas similares foram exploradas e recebidas com sucesso em outros países, como a plataforma alemã Ökobaudat, que teve sua primeira versão lançada em 2009 e última atualização em junho de 2023.

A existência do Sidac, ou até mesmo de dados específicos brasileiros em outras bases de dados difundidas como a Ecoinvent, ajudam a responder a parte dos desafios que dificultam a popularização do pensamento de ciclo de vida na indústria da construção, como a complexidade, o custo e o tempo necessários

para coleta de dados (Beemsterboer, Baumann e Wallbaum, 2020). Além disso, promovem a aproximação de atores como fabricantes, arquitetos, engenheiros e consultores com a realidade nacional no que diz respeito aos principais impactos ambientais.

Frente a essas questões, a primeira motivação para esta dissertação é fazer avançar o que se sabe sobre as possibilidades metodológicas para a aplicação prática da ACV, dentro da realidade da construção brasileira. O trabalho também busca responder à lacuna apontada IPCC (2023), referente à falta de estudos de caso em países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil. Além disso, considera a problemática da falta de ferramentas digitais que possam ser utilizadas diariamente e de forma prática pelos profissionais da área – abordada em estudos recentes, como os de Di Bari *et al.* (2022), Giaveno *et al.* (2021) e Balouktsi *et al.* (2020).

1.1 Objetivos e resumo do método

Este trabalho tem como objetivo principal propor uma ferramenta digital que simplifique a aplicação prática da ACV, tendo como público-alvo estudantes da área de arquitetura, engenharia e construção (AEC) e projetistas não-especialistas em ACV. O escopo do trabalho engloba casas térreas unifamiliares de baixo padrão, no Brasil, construídas em concreto armado com vedação em blocos cerâmicos, alvenaria estrutural com blocos de concreto ou em *wood frame*.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Quantificar a emissão de CO₂ relativa à construção de residências unifamiliares brasileiras em diferentes sistemas construtivos, identificando os materiais mais impactantes;
- Criar indicadores para a estimativa de emissões de CO₂ incorporadas a casas térreas unifamiliares no Brasil, a partir de dados brasileiros;

- Incorporar os indicadores encontrados a uma ferramenta digital gratuita e de interface simplificada em comparação às alternativas disponíveis.

Tendo isso em vista, a primeira etapa do trabalho foi selecionar o recorte de edificações a serem avaliadas. Foi selecionada a tipologia residencial unifamiliar, considerando casas térreas de área construída entre 39 e 52 m². Foram quantificadas as emissões de CO₂ para três modelos residenciais baseados em alvenaria e sete modelos residenciais baseados em madeira, considerando diferentes cenários de consumo de material e as incertezas relacionadas às emissões.

A partir desses resultados, propõe-se uma ferramenta online simplificada, gratuita e de livre acesso, para estimativa das emissões de CO₂ incorporado em projetos residenciais unifamiliares, térreos e de padrão social. O método utilizado para a criação da ferramenta tem como objetivo simplificar a tradicional Avaliação do Ciclo de Vida, utilizando como pilares a Avaliação do Desempenho Ambiental da Construção (ADAC) (Belizario-Silva *et al.*, 2022) e projetos-padrão amplamente replicados no Brasil. Os resultados dessa etapa são úteis para apontar direcionamentos em direção à simplificação das ferramentas de ACV, com o objetivo de facilitar para não-especialistas o cálculo da pegada de CO₂. Ainda, é uma resposta à crescente digitalização da arquitetura, e à necessidade de ferramentas específicas que atuem como uma calculadora de precisão local para o país.

1.2 Recorte adotado

A dissertação tem como recorte de tipologia arquitetônica as habitações unifamiliares, térreas e de padrão social, e considera como recorte geográfico o

cenário brasileiro de construção. A categoria de impacto avaliada por meio da ACV é o potencial de aquecimento global – considerando apenas as emissões de gás carbônico (CO₂), que representam mais de 95% das emissões totais de gases de efeito estufa do setor da construção (IPCC, 2023).

Em relação aos sistemas construtivos considerados, estão inclusos: o sistema convencional de concreto armado com uso de alvenaria cerâmica, a alvenaria estrutural com blocos de concreto e quatro sistemas baseados em madeira, nomeadamente envolvendo as técnicas de *wood frame*, CLT², macho e fêmea e mata-junta.

1.3 Estrutura da dissertação

O presente Capítulo 1 introduz o contexto e a problemática do tema abordado no trabalho, bem como apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos, as etapas metodológicas resumidas e o recorte adotado para investigação. Ainda, apresenta a estrutura do texto.

Em seguida, o Capítulo 2 apresenta os conceitos e premissas adotados com base na literatura. Primeiro, é abordada a Avaliação do Ciclo de Vida – definições, marcos temporais e estado da arte da aplicação na arquitetura. Em seguida, é apresentado um panorama sobre o uso da ACV no contexto da digitalização da arquitetura, e abordam-se as ferramentas já existentes no contexto internacional e nacional. Por fim, são apresentadas as discussões atuais sobre a contribuição da ACV no contexto do desenvolvimento sustentável, bem como as dificuldades envolvidas em sua implementação dentro do setor da construção.

Os materiais e métodos adotados no trabalho são detalhados no Capítulo 3. Primeiro, são apresentados os modelos residenciais que foram adotados como

² Do inglês *Cross-Laminated Timber*, em português também chamado de madeira laminada cruzada.

estudos de caso, suas premissas e o consumo de materiais estabelecido para cada sistema construtivo. Depois, são descritos os procedimentos para o emprego da ACV e os fatores de emissão adotados, por material e por cenário, neste estudo. Para concluir, são descritos os critérios e procedimentos para a criação da ferramenta simplificada para cálculo de emissões de CO₂.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados de emissão de carbono dos cenários selecionados, englobando uma análise comparativa com ênfase quantitativa. Em seguida, são apresentados indicadores numéricos de impacto ambiental por cenário estudado, bem como a interface e o modo de funcionamento da ferramenta simplificada que foi proposta.

Em seguida, o Capítulo 5 discute os resultados de maneira global, propondo uma análise comparativa com os dados da literatura recente, mas anterior ao banco de dados do Sidac (2022). Particularmente, é demonstrado o potencial do uso de dados coletados no Brasil para o aumento da precisão de estimativas de emissão na tipologia residencial unifamiliar.

Finalmente, o Capítulo 6 discorre sobre as considerações finais do trabalho, com ênfase nas principais conclusões do estudo e nas perspectivas de continuidade do trabalho no presente tópico de investigação.

Referências do capítulo

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009. 21 p. Versão corrigida em julho de 2014.

ASADOLLAHFARDI, G.; ASADI, M.; KARIMI, S. Life-cycle assessment of construction in a developing country. **Environmental Quality Management**, v. 24, n. 4, p. 1-107, jun. 2015. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/tqem.21398>. Acesso em: 22 jan. 2025.

AKTÜRK, Gül. A systematic overview of the barriers to building climate adaptation of cultural and natural heritage sites in polar regions. **Environmental Science & Policy**, v. 136, p. 19-32, out. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.05.016>. Acesso em: 21 jan. 2025.

ANAND, Chirjiv Kaur; AMOR, Ben. Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 67, p. 408–416, jan. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.058>. Acesso em: 20 jan. 2025.

APELLÁNIZ, Diego; PASANEN, Panu; GENGNAGEL, Christoph. A Holistic and Parametric Approach for Life Cycle Assessment in the Early Design Stages. In: ANNUAL SYMPOSIUM ON SIMULATION FOR ARCHITECTURE AND URBAN DESIGN (SIMAUD), 12., 2021, [online]. **Proceedings of the 12th Annual Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design**. San Diego: Society for Computer Simulation International, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/354193697_A_Holistic_and_Parametric_Approach_for_Life_Cycle_Assessment_in_the_Early_Design_Stages. Acesso em: 20 jan. 2025.

BALOUKTSI, Maria; LÜTZKENDORF, T.; RÖCK, Martin; PASSER, Alexander; REISINGER, Theres; FRISCHKNECHT, Rolf. Survey results on acceptance and use of Life Cycle Assessment among designers in world regions: IEA EBC Annex 72. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 588, art. 032023, nov. 2020. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/588/3/032023>. Acesso em: 20 jan. 2025.

BAMDAD, Keivan; CHOLETTE, Michael E.; OMRANI, Sara; BELL, John. Future energy-optimised buildings — Addressing the impact of climate change on

buildings. **Energy and Buildings**, v. 231, jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110610>. Acesso em: 21 jan. 2025.

BEEEMSTERBOER, Sjouke; BAUMANN, Henrikke; WALLBAUM, Holger. Ways to get work done: a review and systematisation of simplification practices in the LCA literature. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, n. 11, p. 2154–2168, set. 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-020-01821-w>. Acesso em: 20 jan. 2025.

BELIZARIO-SILVA, Fernanda; OLIVEIRA, Lidiane Santana; REIS, Daniel Costa; COSER, Arthur; PATO, Gabriel; YOSHIDA, Olga; DEGANI, Clarice; PUNHAGUI, Kátia; PACCA, Sérgio; JOHN, Vanderley. **Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção – Metodologia**. 1ª ed. São Paulo: SIDAC, 2022.

BELIZARIO-SILVA, Fernanda; OLIVEIRA, Lidiane Santana; REIS, Daniel Costa; PATO, Gabriel Torres Gomes; MARINHO, Arthur Coser; DEGANI, Clarice Menezes; CALDAS, Lucas Rosse; PUNHAGUI, Katia Regina Garcia; PACCA, Sérgio Almeida; JOHN, Vanderley Moacyr. The Sidac system: Streamlining the assessment of the embodied energy and CO2 of Brazilian construction products. **Journal of Cleaner Production**, v. 421, art. 138461, out. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623026197>. Acesso em: 20 jan. 2025.

DERVISHAJ, Arlind; GUDMUNDSSON, Kjartan. From LCA to circular design: A comparative study of digital tools for the built environment. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 200, art. 107291, jan. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107291>. Acesso em: 21 jan. 2025.

DI BARI, Roberta; HORN, Rafael; BRUHN, S.; ALAUX, Nicolar; SAADE, Marcella Ruschi Mendes; SOUST-VERDAGUER, Bernardette; OBRECHT, Tajda Potrc; HOLLBERG, Alexander; BIRGISDOTTIR, Harpa; PASSER, Alexandre; FRISCHKNECHT, Rolf. Buildings LCA and digitalization: Designers' toolbox based on a survey. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 1078, art. 012092, set. 2022. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1078/1/012092>. Acesso em: 20 jan. 2025.

DONG, Jie; SCHWARTZ, Yair; KOROLIJA, Ivan; MUMOVIC, Dejan. The impact of climate change on cognitive performance of children in English school stock: A simulation study. **Building and Environment**, v. 243, set. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110607>. Acesso em: 21 jan. 2025.

Ecoinvent Association. (2019). Ecoinvent database (v.3.6) [banco de dados].

FEDERAL MINISTRY FOR HOUSING, URBAN DEVELOPMENT AND BUILDING.
ÖKOBAUDAT: database for ecological evaluations of construction. Alemanha:
Federal Ministry for Housing, Urban Development and Building, 2024. Disponível
em: <https://www.oekobaudat.de/en.html>. Acesso em: 21 jan. 2025.

GIAVENO, Sara; OSELLO, Anna; GARUFI, Davide; RAZO, Diego Santamaria.
Embodied Carbon and Embodied Energy Scenarios in the Built Environment.
Computational Design Meets EPDs. **Sustainability**, v. 13, n. 21, art. 11974, out.
2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su132111974>. Acesso em: 20 jan.
2025.

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Summary for
Policymakers. In: **Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of
Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the
Intergovernmental Panel on Climate Change** [Core Writing Team, H. Lee and J.
Romero (eds.)]. Geneva: IPCC, 2023, p. 1-34. Disponível em:
[https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerRep
ort.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerRep.pdf). Acesso em: 21 jan. 2025.

JOBIN, Rémy.; SIÉ, M. Tools for environment's web application for Life Cycle
Assessment (LCA). Proceedings of the 25th In: International Conference on
Informatics for Environmental Protection (ENVIROINFO 2011), 25., Ispra.
Proceedings of the 25th EnviroInfo Conference. Shaker Verlag, 2011.

KYLILI, Angeliki; MILOS, Ilic; FOKAIDES, Paris A. Whole-building Life Cycle
Assessment (LCA) of a passive house of the sub-tropical climatic zone.
Resources, Conservation and Recycling, v. 116, p. 169-177, jan. 2017.
Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.10.010>. Acesso em: 22
jan. 2025.

LASVAUX, Sébastien; GANTNER, Johannes; SCHIOPU, Nicoleta; NIBEL, Sylviane;
BAZZANA, Manuel; BOSDEVIGIE, Boris; SIBIUDE, Galdric. Towards a new
generation of building LCA tools adapted to the building design process and to
the user needs. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE BUILDINGS,
CONSTRUCTION PRODUCTS AND TECHNOLOGIES (SB13), 13., Graz. **Proceedings
of the International Conference on Sustainable Buildings, Construction
products and Technologies (SB13)**. Graz: T.U. Graz, 2013. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/260988823_Towards_a_new_generatio

[n of building LCA tools adapted to the building design process and to the user needs](#). Acesso em: 20 jan. 2025.

MITCHELL, Daniel; HEAVISIDE, Clare; VARDOULAKIS, Sotiris; HUNTINGFORD, Chris; MASATO, Giacomo; GUILLOD, Benoit P; FRUMHOFF, Peter; BOWERY, Andy; WALLOM, David; ALLEN, Myles. Attributing human mortality during extreme heat waves to anthropogenic climate change. **Environmental Research Letters**, v. 11, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074006>. Acesso em: 21 jan. 2025.

NABONI, Emanuele. The Use of Facade Mockups in LCA Based Architectural Design. **Procedia Engineering**, v. 180, p. 759-766, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.236>. Acesso em: 21 jan. 2025.

NAÇÕES UNIDAS. Acordo de Paris. Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Paris, 12 dez. 2015 (vigente a partir de 4 nov. 2016). Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>. Acesso em: 21 jan. 2025.

PROIETTI, Stefania; SDRINGOLA, Paolo; DESIDERI, Umberto; ZEPPARELLI, Francesco; MASCIARELLI, Francesco; CASTELLANI, Francesco. Life Cycle Assessment of a passive house in a seismic temperate zone. **Energy and Buildings**, v. 64, p. 463–472, set. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.05.013>. Acesso em: 20 jan. 2025.

Sobre o G20. Disponível em: <https://g20.gov.br/pt-br/sobre-o-g20>. Acesso em: 9 fev. 2025.

UNEP - United Nations Environment Programme. **Building Materials and the Climate: Constructing a New Future..** Nairobi: UNEP, 2023. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/report/building-materials-and-climate-constructing-new-future>. Acesso em: 21 jan. 2025.

VELIYULIN, Eric. ExploreLCA – A Web Application for Exploring Systematised Life Cycle Assessments of Buildings. 2021. 109 f. Dissertação (Mestrado em Informática), Norwegian University of Science and Technology, 2021. Disponível em: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2788480?show=full>. Acesso em: 20 jan. 2025.

Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (Sidac). 2022. Disponível em <https://Sidac.org.br/>.

WBCSD - World Business Council for Sustainable Development. **Decarbonizing construction: Guidance for investors and developers to reduce embodied carbon.** Geneva: WBCSD, 2021. Disponível em: <https://archive.wbcsd.org/Programs/Cities-and-Mobility/Sustainable-Cities/Transforming-the-Built-Environment/Decarbonization/Resources/Decarbonizing-construction-Guidance-for-investors-and-developers-to-reduce-embodied-carbon>. Acesso em: 21 jan. 2025.

WORLD GREEN BUILDING COUNCIL. **EU Policy Whole Life Carbon Roadmap.** London: World GBC, 2022. Disponível em: <https://viewer.ipaper.io/worldgbc/eu-roadmap/?page=2>. Acesso em: 21 jan. 2025.

ZABALZA, Ignacio; SCARPELLINI, Sabina; ARANDA, Alfonso; LLERA, Eva; JÁÑEZ, Alberto. Use of LCA as a Tool for Building Ecodesign. A Case Study of a Low Energy Building in Spain. **Energies**, v. 6, n. 8, p. 3901–3921, ago. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en6083901>. Acesso em: 20 jan. 2025.

CAPÍTULO 2

REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta os conceitos principais e as definições adotadas para o embasamento teórico da dissertação. Está dividido em quatro tópicos fundamentais que abordam: a Avaliação do Ciclo de Vida e outras ferramentas para sustentabilidade na arquitetura (2.1), o desenvolvimento sustentável e a contribuição da ACV (2.2), culminando em uma revisão das dificuldades citadas pela literatura em relação a implementação da ACV no setor da construção (2.3).

Inicialmente, são apresentadas a definição e as normas de ACV adotadas no trabalho, seguidas da base teórica para a modelagem dos cenários considerados nesta pesquisa. Em seguida, ao abordar as ferramentas para sustentabilidade na arquitetura, são destacados o surgimento dos sistemas de certificação, bem como a evolução das ferramentas de arquitetura em direção à digitalização. São apresentadas as definições de outras ferramentas que podem ser utilizadas de forma complementar à ACV, como o BIM, o passaporte de materiais, o plano de gestão de resíduos e as realidades virtual e aumentada. Adicionalmente, são elencadas algumas dificuldades na implementação dessas ferramentas.

Em seguida, no subitem 2.2, Desenvolvimento sustentável e contribuição da ACV, são apresentados os marcos históricos em relação ao avanço do tema no setor da construção civil. Além disso, foi feita uma revisão sistemática da literatura com o objetivo de identificar a contribuição da ACV em direção aos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) da Agenda 2030.

Por fim, apresentam-se as dificuldades de aplicação da ACV a partir das considerações gerais sobre as desvantagens das ferramentas atuais para ACV, abordando desafios envolvendo o acesso, os custos e o nível de precisão dos

dados. Também é apresentada uma revisão acerca das bases de dados e programas usados atualmente nesse escopo.

2.1 Ferramentas para sustentabilidade na arquitetura

Os anos 1990 foram o marco inicial da formalização da ACV, com o lançamento da norma NBR ISO 14040. É a década na qual começam também a ser postos em prática os sistemas de certificação, sugerindo um estímulo por ferramentas e soluções que buscam a promoção de edificações menos impactantes ambientalmente (Costa, Carvalho e Alves, 2022). No Reino Unido, o BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) surge em 1989 como o primeiro sistema de avaliação da sustentabilidade de edificações, sendo hoje um dos mais utilizados no mundo junto ao LEED e o HQE (Costa; Carvalho; Alves, 2022). O BREEAM propôs uma definição padronizada do que eram edificações sustentáveis, avaliando seus desempenhos de acordo com as exigências feitas pelo sistema de certificação. Segundo Kibert (2020), a iniciativa foi o primeiro esforço bem-sucedido na avaliação de desempenho de energia, consumo de água, qualidade do ambiente interno, localização, materiais utilizados e impactos ambientais das construções.

Sistemas similares foram desenvolvidos em seguida: o LEED, pelo USGBC (United States Green Building Council) nos Estados Unidos, na década de 1990, que foi adaptado para o Brasil com a certificação GBC Casa, em 2014; o CASBEE (Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency) no Japão, em 2004; o francês HQE, de 2004, e sua versão brasileira AQUA-HQE, de 2008; o Green Star na Austrália, em 2006; o DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen) na Alemanha, em 2009; o brasileiro Casa Azul Caixa, de 2009; e o EDGE, de 2014 (Kibert, 2020; Costa, Carvalho e Alves, 2022).

Anand e Amor (2017), em uma revisão da literatura sobre a aplicação da ACV na construção, apontam que uma das maiores lacunas dos últimos anos é a integração da ACV com os sistemas de certificação – e que ela pode ser minimizada com o envolvimento da indústria. Costa, Carvalho e Alves (2022) demonstram que, apesar das certificações contribuírem para a redução de impactos ambientais, para a melhoria de processos da construção civil e para o atendimento dos ODS, existem algumas inconsistências nos critérios utilizados pelos sistemas de certificação. Por exemplo, o selo EDGE está descompassado em relação aos demais, valorizando desproporcionalmente medidas para economia energética, e o selo Casa Azul + Caixa, apresenta pouca preocupação com a escolha de materiais de baixo impacto, além de ter certificado relativamente pouco no Brasil em comparação com o mais utilizado - LEED (Costa, Carvalho e Alves, 2022).

Existem ainda as declarações ambientais de produto (EPD), baseadas em princípios das normas ISO 14025:2020 e ISO 21930:2023 que objetivam mobilizar o setor da construção e conscientizar consumidores e produtores acerca da qualidade ambiental dos produtos. No Brasil, além das EPD, que estão disponíveis publicamente e são gratuitas para download (Fundação Vanzolini, 2024), existem também outros selos como o RGMAT, o GHG Protocol, o Rótulo Ecológico ABNT e o selo FSC (*Forest Stewardship Council*), sendo o último voltado para produtos madeireiros e de origem florestal (Carvalho, 2020).

Kibert (2020) defende que as certificações representam o que há de mais novo nos sistemas de avaliação da atualidade. Em contrapartida, Caldas *et al.* (2022) identificaram – em um trabalho recente de revisão da literatura –, que a ACV é a ferramenta mais utilizada em estudos que buscam contribuir para a mitigação das mudanças climáticas, e que as certificações ambientais hoje são uma ferramenta dentre diversas outras, como a modelagem da informação da

construção (BIM), o passaporte de materiais, o plano de gestão de resíduos, a realidade aumentada e a realidade virtual.

Complementando Caldas *et al.* (2022), o trabalho de Bai *et al.* (2020) discorre sobre como outras tecnologias podem ser aliadas no atendimento dos ODS. De interesse particular para o ODS Cidades e Comunidades Sustentáveis (CCS), por exemplo, as tecnologias com potencialmente o maior impacto são a inteligência artificial, robôs autônomos, *big data*, *cloud* e RFID - localização de determinado objeto *via* comunicação wireless entre o mesmo e um dispositivo (Bai *et al.*, 2020).

Deste modo, é seguro dizer que estão surgindo novas ferramentas que podem auxiliar nas avaliações ambientais das escolhas de projeto para edificações sustentáveis, e, ainda, que boa parte delas são ferramentas digitais. De acordo com Salgado (2020), a vantagem das tecnologias digitais está na fase de concepção de projetos de arquitetura, permitindo, por exemplo, realizar simulações de desempenho ambiental ainda na fase de concepção ou identificar antecipadamente incompatibilidades entre diferentes especialidades de projeto, evitando retrabalho e desperdício de materiais de construção.

Vale ressaltar que existem dificuldades nesses processos, como garantir que a execução da obra seguirá exatamente o que foi previsto desde a concepção. Em contrapartida, Caldas, Carvalho e Toledo Filho (2020) destacam que “quanto mais distante da etapa de concepção a ACV é realizada, menor será sua contribuição para uma maior sustentabilidade ambiental do projeto”, visto que, com os itens definidos e compatibilizados, fica cada vez mais difícil empregar modificações para atender as necessidades que venham a surgir – sejam elas socioambientais ou econômicas. Dessa forma, é possível dizer que essa questão é uma das maiores dificuldades na implementação da ACV.

No Brasil, o trabalho de Tavares (2006) destaca-se pela criação de um método para o cálculo da energia embutida total em uma edificação, além do

cálculo de emissão de CO₂ por fases do ciclo de vida e por materiais utilizados, em cinco modelos que simulam as principais características físicas e ocupacionais de edificações residenciais brasileiras. Os achados de Tavares (2006) demonstraram que as diferentes tipologias de edificação residencial, a área construída e o processo de fabricação dos materiais empregados, bem como o desperdício de materiais, são alguns dos fatores que mais influenciam na sustentabilidade de uma construção.

Similarmente, o trabalho de Costa (2012) foi pioneiro na criação e aplicação de um método para estimativa de emissões de CO₂ relacionadas a materiais de construção brasileiro, em diferentes níveis de precisão. Ao aplicar seu método em uma residência unifamiliar típica no Brasil, Costa (2012) conseguiu comprovar que a fase de produção dos materiais empregados na construção dessa casa é responsável por aproximadamente 40% das emissões totais geradas no ciclo de vida dessa edificação.

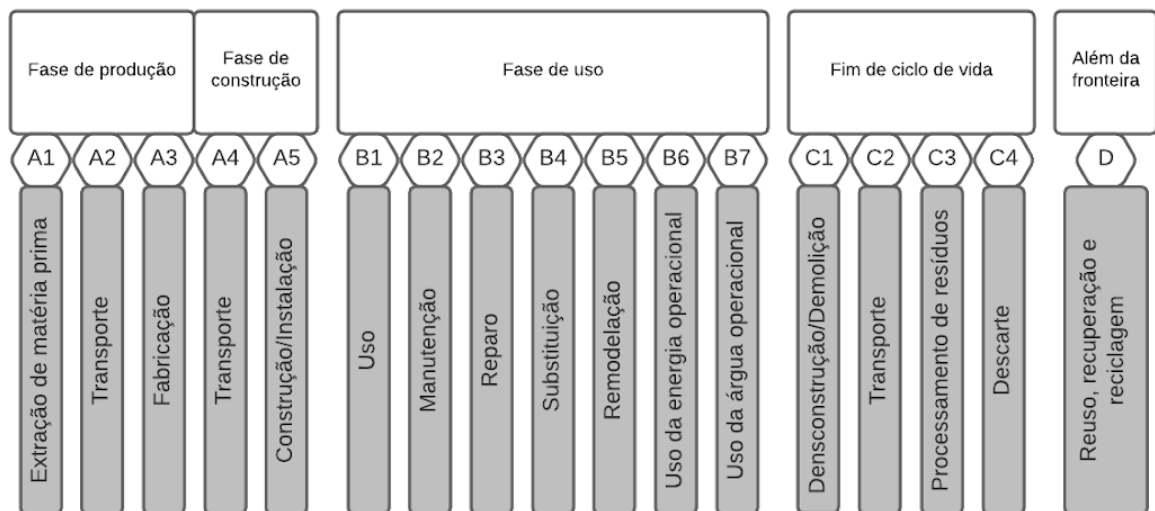
Por fim, o trabalho de Carvalho (2020) também é referência para o presente estudo, ao passo em que, ao provar a importância da ACVCO₂ como ferramenta de decisão de projeto na arquitetura em um estudo de caso em residência unifamiliar brasileira, aponta a escassez de dados específicos brasileiros como um problema. Além disso, Carvalho (2020) ressalta a importância de ferramentas digitais como agentes facilitadores do fluxo de trabalho que envolve a ACV.

Considerando esse panorama, nos subitens abaixo são apresentadas algumas definições adotadas no que diz respeito à ACV, método no qual o presente trabalho está baseado, bem como definições adotadas para outras ferramentas, incluindo certificações ambientais. Tais ferramentas podem ser utilizadas de forma complementar à ACV, contribuindo para a mitigação de impactos relacionados às mudanças climáticas.

2.1.1 Avaliação do Ciclo de Vida

A Avaliação do Ciclo de Vida, abreviada como ACV, é uma ferramenta metodológica que pode ser aplicada para estimar e avaliar “potenciais impactos ambientais de produtos ou sistemas ao longo de seu ciclo de vida”, de acordo com a NBR ISO 14040. Os ciclos de vida, por sua vez, são compostos por todas as etapas da “vida” deste processo ou produto, desde a extração das matérias-primas necessárias até o fim da vida útil. Considerando o contexto do presente trabalho, apresenta-se a Figura 1, que descreve as fases do ciclo de vida de uma edificação, incluindo as etapas de produção, construção, uso e fim de ciclo de vida, com base na norma EN 15978:2011.

Figura 1 — Fases do ciclo de vida de edificações.



Fonte: Adaptado de EN 15978.

No âmbito da arquitetura e construção, a ACV pode ser aplicada em diferentes contextos, desde a escala do produto até a escala urbana – o subitem 2.3 apresenta uma revisão sistemática que exemplifica algumas dessas aplicações em maior detalhe. De maneira geral, pode-se dizer que é uma ferramenta amplamente utilizada na literatura para tomada de decisão ambiental,

fornecendo dados quantitativos sobre o impacto de determinadas soluções, além de auxiliar na obtenção de determinadas certificações ambientais de edifícios.

A fim de garantir a consistência da aplicação da ACV e a comparabilidade dos resultados encontrados, existem normas e diretrizes internacionais a serem consultadas. São elas:

- **NBR ISO 14040:2014 – Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura:** descreve os princípios e estrutura das fases da ACV, bem como cita suas limitações, elementos opcionais e considerações gerais sobre revisão crítica da ACV.
- **NBR ISO 14044:2014 – Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações** (corrigida em 2014): especifica os requisitos e provê orientações para a ACV, incluindo também limitações e elementos opcionais, de forma complementar à ISO 14040.
- **ABNT ISO/TR 14049:2014 – Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 à definição de objetivo e escopo e à análise de inventário:** relatório técnico (TR) que oferece informação suplementar à NBR ISO 14044, com base em exemplos de maneiras de aplicação da norma.
- **ABNT ISO/TS 14072:2019 – Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e diretrizes para avaliação do ciclo de vida organizacional:** especificação técnica (TS) dedicada à aplicação de ACV em organizações, para ACV organizacional (ACVO), que pode ou não levar em conta aspectos relacionados ao ciclo de vida de edificações.

- **ISO 21930:2023 – Sustainability in buildings and civil engineering works – Core rules for environmental product declarations of construction products and services:** fornece os princípios, especificações e requisitos para desenvolver uma declaração ambiental de produto (EPD ou DAP) para produtos e serviços de construção, incluindo as regras para o cálculo da análise de inventário do ciclo de vida (ACV); complementa a ISO 14025.

Tendo em vista os objetivos do trabalho, foram considerados para as estimativas das emissões de CO₂, em todos os diferentes cenários avaliados, dados primários brasileiros. Para isso, a primeira referência utilizada foi o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (Sidac) – um sistema online para avaliação de energia incorporada e emissões de CO₂ de produtos da construção, do berço ao portão.

O Sidac utiliza dados primários por produto, facilitando o cálculo de indicadores de ciclo de vida e ajudando a promover a redução de carbono na construção por meio de um sistema de informações confiável. Além disso, o sistema também foi desenvolvido pensando na tendência de digitalização e simplificação da ACV, e serve como um modelo para ferramentas similares que buscam acelerar a adoção do pensamento de ciclo de vida em outros países (Belizario-Silva *et al.*, 2023).

Apesar de, até o momento, o Sidac estar limitado a dois indicadores (demanda de energia primária e emissões de CO₂), sua contribuição para uma avaliação adequada ao contexto brasileiro é de grande relevância. Uma possível aplicação do sistema no país, apontada por Belizario-Silva *et al.* (2023), é na estimativa de projetos financiados pelo governo federal, como as casas do programa “Minha Casa, Minha Vida” (Brasil, 2023). Além disso, pode fornecer indicadores de ciclo de vida para programas como o CECarbon (Sinduscon-SP, 2023) e ser incorporado

em *softwares* de *design* estrutural e BIM (Almeida *et al.*, 2023; Giaveno *et al.*, 2021; Röck *et al.*, 2018).

No presente trabalho, os dados primários do Sidac foram utilizados para cenários de alvenaria convencional, detalhados no Capítulo 3.

Para os sistemas construtivos em madeira, foram utilizados os dados de Orlandini e Punhagui (2024), que apresentam cenários estratégicos para a redução de emissões de CO₂ e estoque temporário de carbono no Brasil por meio do uso da madeira na construção de casas brasileiras. Nomeadamente, foram adotados desse trabalho os valores de consumo de madeira (toneladas/m² de área construída) e de emissões de CO₂ (kg/m² de área construída) nos quatro sistemas construtivos em madeira especificados pelas autoras: mata junta, pré-fabricado macho e fêmea, *wood frame* e CLT. Adicionalmente, foram consideradas as incertezas em relação ao consumo e na origem da madeira (plantada ou nativa), tendo como referência o mesmo estudo (Orlandini e Punhagui, 2024).

2.1.2 Ferramentas complementares à ACV

Com o crescimento da digitalização da arquitetura, o *Building Information Modeling* (BIM) é uma das ferramentas mais utilizadas. De acordo com a revisão de literatura feita por Caldas *et al.* (2022), o BIM pode contribuir: 1) Nas fases de concepção, auxiliando na quantificação dos materiais de modo automático, e a projetar de acordo com os requisitos das certificações ambientais (como o LEED); 2) Na fase de construção, para otimizar o uso de energia e de água, bem como reduzir a geração de resíduos; 3) Na fase de uso da edificação, para gerenciamento de recursos como energia e água; 4) No fim de vida, para ajudar a quantificar os resíduos, gerenciá-los e avaliar o potencial de reciclagem dos materiais.

As vantagens do BIM estão na facilidade de visualização, coordenação, simulação e otimização (Wong e Zhou, 2015; Lu, Chang e Li, 2017), além de contribuir para a confiabilidade da ACV, já que provê dados quantitativos mais precisos. No contexto da ACV, pode ser usado para cálculos de impacto diretamente nos modelos, processo chamado de BIM4LCA – que é operacionalmente simples, mas eficaz no fornecimento de feedback rápido para uma melhor tomada de decisão projetual (Gomes e Barros, 2018).

Alguns exemplos são o trabalho de Röck *et al.* (2020), que exemplifica um método de aplicação de BIM4LCA por meio de um script que identifica pontos do projeto com potencial para redução do impacto ambiental; E o trabalho de Hao *et al.* (2020), que ao usar o BIM para quantificar as emissões de gases de efeito estufa observou uma redução de até 15% em emissões usando métodos de pré-fabricação, quando comparados aos tradicionais. No Brasil, Carvalho (2020) destaca que um dos problemas relacionados ao uso do BIM para ACV é a interoperabilidade, que pode resultar em erros ou perdas de informações ao longo do processo de ACV.

Uma ferramenta que pode ser utilizada de forma integrada à ACV e ao Bim é o passaporte de materiais, que apesar de não possuir uma definição amplamente aceita pela literatura (Dervishaj e Gudmundsson, 2024), pode ser descrito como um documento digital que contém informações sobre materiais, um produto ou sistema usado na construção de um edifício (Hoosain *et al.*, 2021). É uma ferramenta que fornece informações detalhadas, quantitativas e qualitativas, sobre a composição de materiais, componentes ou elementos construtivos (Munaro *et al.*, 2019).

Um exemplo é o estudo de Honic *et al.* (2019), que comparou sistemas construtivos baseados em concreto e madeira para edifícios residenciais na Áustria. Os autores identificaram por meio do uso do passaporte de materiais que, enquanto a alternativa em concreto apresenta maior reciclabilidade, a opção de

madeira gera menos resíduos. Dessa forma, o passaporte de materiais pode auxiliar em questões de reciclabilidade de edifícios novos e existentes, contribuindo para a redução de emissões de CO₂ (Caldas *et al.*, 2022).

De modo similar ao passaporte de materiais, o plano de gestão de resíduos também se apresenta como uma ferramenta que atua como uma base de dados, servindo de referência para futuros projetos ao passo em que registra todos os dados sobre resíduos de uma construção por fases (Colangelo *et al.*, 2020; Colangelo, Cioffi e Farina, 2021). Pode ser utilizado para a mitigação das mudanças climáticas por permitir a recuperação de materiais como alumínio, ferro, cobre, papel e plástico, além da reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD) como agregados em materiais baseados em cimento (Caldas *et al.*, 2022; Nußholz, Nygaard e Milios, 2019). Apesar da importância dessa ferramenta no contexto de construção sustentável, o plano de gestão de resíduos não é expressivamente citado na literatura científica (Caldas *et al.*, 2022).

Por fim, destacam-se em estudos recentes a realidade aumentada (RA) e a virtual (RV). Enquanto a RA é funciona como uma extensão visual computadorizada e em 3D do mundo real, que pode ser utilizada para a visualização de projetos, inclusive de forma integrada com modelos BIM (BAMB, 2020; Turkan, 2017), a RV é uma tecnologia utilizada para criar uma percepção de ambiente de diferentes formas, como por exemplo por meio do uso de óculos (Caldas *et al.*, 2022).

A RA e a RV são ferramentas em potencial para interação com projetos reais, permitindo apresentar visualmente uma série de informações ao adentrar um determinado espaço virtual (Hollberg *et al.*, 2021). É especialmente interessante para o engajamento de usuários fora da comunidade científica, por possibilitar uma alternativa de comunicação de resultados de ACV entre pessoas especialistas e não especialistas (Houlihan Wiberg *et al.*, 2019; Juraschek *et al.*, 2018).

2.2 Desenvolvimento sustentável e a contribuição da ACV

O movimento pelo desenvolvimento sustentável tem início em 1960, com a Primeira Década do Desenvolvimento das Nações Unidas (NAÇÕES UNIDAS, 1961). Barbieri (2020) argumenta que desde o princípio, o movimento tem um caráter multidisciplinar que leva em consideração não apenas o crescimento econômico, como também os impactos na sociedade e no ambiente. Esses três pilares – aspectos econômicos, sociais e ambientais/ecológicos – são essenciais para que a construção civil caminhe de forma sustentável (Buyle, Braet e Audenaert, 2013).

Boff (2017), por outro lado, defende que o conceito de sustentabilidade teria surgido quatro séculos antes, na Província da Saxônia, onde surgiu pela primeira vez a preocupação pelo uso racional, regeneração e manutenção de florestas, bem como o termo alemão *Nachhaltigkeit*, que significa sustentabilidade.

Historicamente, destacam-se como marcos importantes na consolidação dos planos em favor do desenvolvimento sustentável: a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano (CNUMAH), realizada em 1972 em Estocolmo, que culminou na decisão de criar o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Pnuma); a publicação do relatório Nosso Futuro Comum pela Comissão Mundial do Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD ou Comissão Brundtland), em 1987 (NAÇÕES UNIDAS, 1987), em que a expressão “desenvolvimento sustentável” aparece definida como “aquela que atende as necessidades das gerações atuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem às suas necessidades e aspirações”; a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (ECO-92), no Rio de Janeiro (NAÇÕES UNIDAS, 1992), que resultou na publicação da Agenda 21 (NAÇÕES UNIDAS, 1992) e outros documentos (Barbieri, 2020); o Protocolo de

Kyoto, acordo assinado em 1997 que visava uma cooperação entre países para redução da emissão de gases de efeito estufa, e posteriormente o Acordo de Paris, em 2015/2016.

Foi com a popularização da Agenda 21 e suas constantes referências a estados, governos e políticas, que a expressão “desenvolvimento sustentável” foi, aos poucos, suprimida e substituída por “sustentabilidade”, mesmo que no âmbito das Nações Unidas e agências derivadas essa troca de termos nunca tenha acontecido (Barbieri, 2020). O autor considera que essa troca de denominações tenha ocorrido para evitar o debate sobre crescimento econômico e as dimensões políticas do desenvolvimento, ainda que, na prática, estes sejam aspectos indispensáveis para atingir os objetivos sustentáveis que estavam sendo propostos.

Já em 2015, as Nações Unidas apresentaram como parte da Agenda 2030 os ODS – após o sucesso dos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM), quinze anos antes (NAÇÕES UNIDAS, 2015). Diferente dos ODM, os ODS foram criados com um envolvimento significativo da sociedade, com metas de implementação, mecanismos de revisão e de correção de rumos (Barbieri, 2020).

A construção civil, por ser um setor que envolve intensivamente recursos, energia e emissões, pode se beneficiar grandemente da Avaliação do Ciclo de Vida na busca pelo desenvolvimento sustentável (Backes e Traverso, 2022). Nesse sentido, algumas lacunas do conhecimento são: i) a falta de dados sobre diferentes tipos de edifícios, de qualquer tipologia, tanto no escopo de emissões de CO₂, consumo de materiais ou de energia; ii) a falta de estudos de caso em países em desenvolvimento; iii) a falta de estudos sobre o impacto do aquecimento global na estrutura do edifício e nos materiais, além da energia e emissões de GEE relacionadas a esse impacto (IPCC, 2023).

Diante do cenário apresentado, propõe-se a seguir uma revisão de literatura, que buscou compreender as reais contribuições da ACV para os ODS.

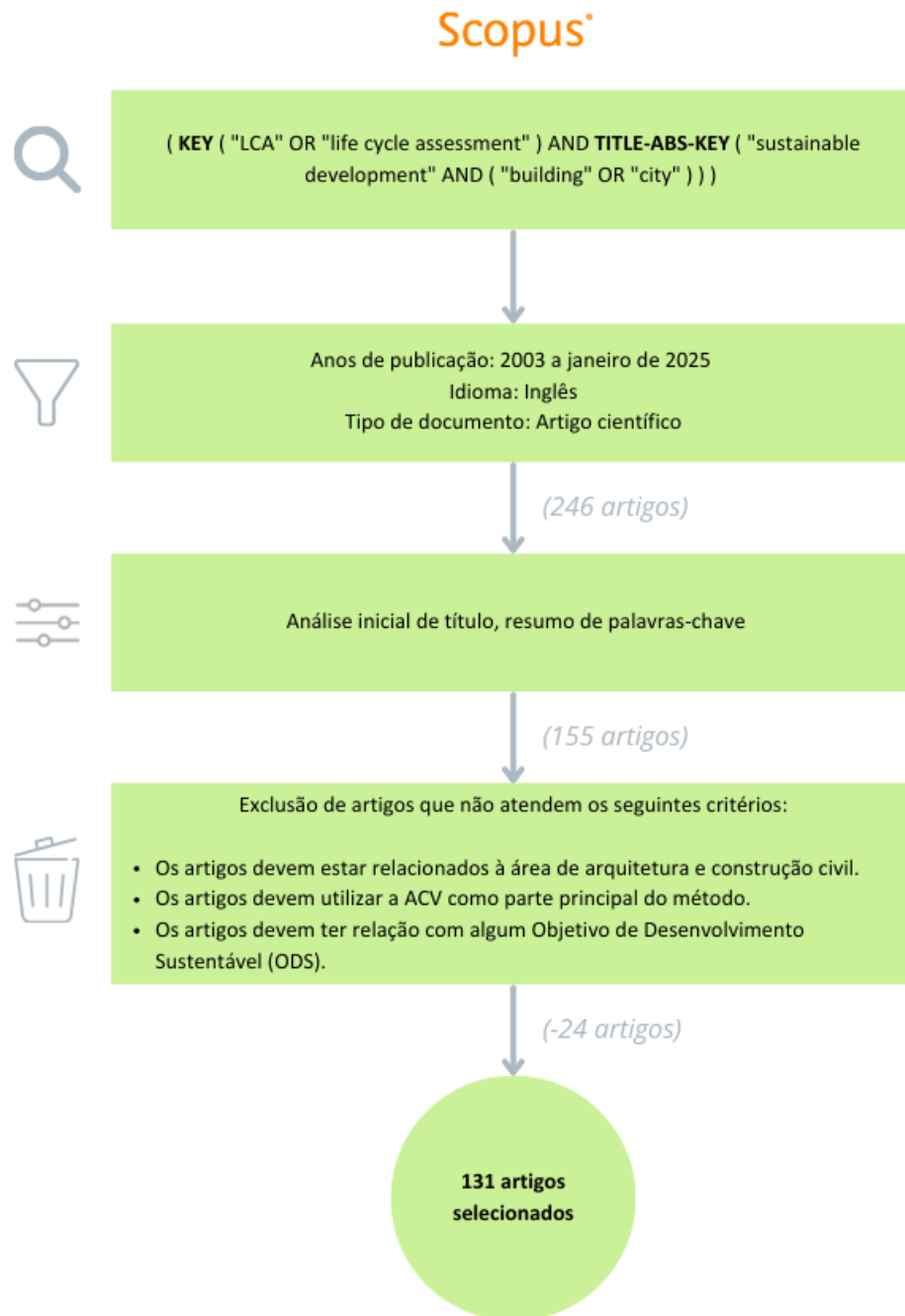
2.2.1 Revisão sistemática da literatura – A contribuição da ACV para os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS)

O presente subitem apresenta uma abordagem pautada em Revisão Sistemática da Literatura (RSL) sobre a contribuição da ACV em direção aos ODS. Como resultado, faz-se uma síntese do estado da arte do uso da ACV enquanto ferramenta capaz de auxiliar no alcance dos ODS da Agenda 2030. Adicionalmente, métodos e abordagens complementares utilizados em diferentes cenários são apresentados.

A metodologia para a RSL consistiu na busca de documentos científicos que empregam a ACV no campo da arquitetura para atingir um ou mais objetivos de desenvolvimento sustentável, feita na base de dados Scopus, considerando artigos científicos em língua inglesa, publicados entre 2003 e 2025 (último mês de pesquisa: janeiro de 2025). Buscou-se identificar os países e periódicos que mais publicaram trabalhos sobre uso de ACV na arquitetura para objetivos de desenvolvimento sustentável, bem como as tendências de métodos e ferramentas associados a essas pesquisas, e, finalmente, discutir a contribuição da metodologia de ACV para os ODS.

A Figura 2 mostra os critérios adotados para a pesquisa e seleção dos artigos científicos considerados na RSL. A busca definida por esses critérios resultou em 246 artigos científicos, que foram reduzidos a 155 após uma análise inicial dos títulos, resumos e palavras-chave. Após a leitura na íntegra dos artigos, 24 foram excluídos por não atender aos critérios de inclusão.

Figura 2 — Fluxograma das etapas e critérios de pesquisa da RSL.



Fonte: Autoria própria.

Durante a leitura integral dos artigos selecionados, buscou-se responder aos seguintes questionamentos de pesquisa: 1) Quais os periódicos que mais publicaram esse tipo de estudo? 2) Quais as tendências de métodos, ferramentas e abordagens utilizados em conjunto a ACV, em estudos que objetivam atingir

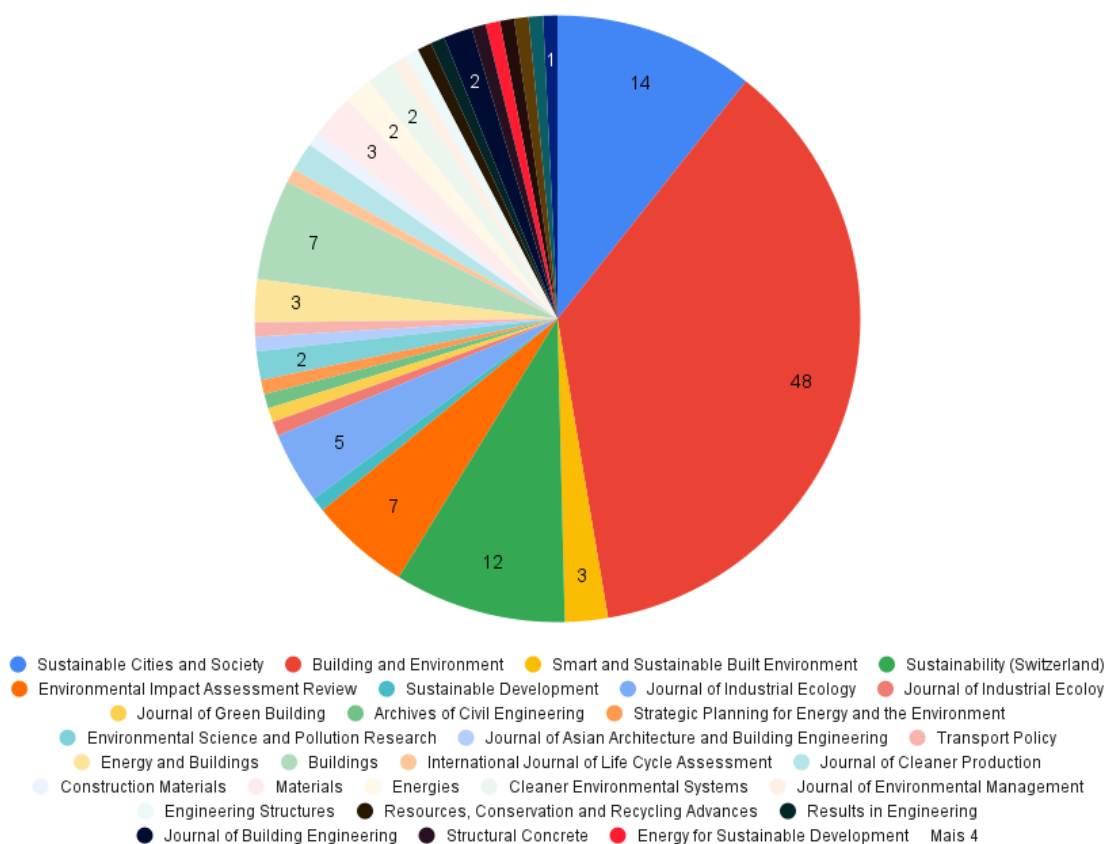
metas de desenvolvimento sustentável? 3) Como a ACV vem contribuindo para o desenvolvimento sustentável?

No geral, é possível reconhecer uma tendência de crescimento no interesse pelo assunto entre 2012 e 2014, com um aumento significativo nas publicações, que foram de 1 para 9 por ano, respectivamente. A mesma coisa acontece entre 2019, ano com 2 publicações no tema, e 2021, com 11 publicações no ano. O número de artigos dentro do escopo estudado manteve-se em 11 durante o ano de 2022, e quadruplicou em 2024, ano para qual foram encontrados 47 artigos. Apesar do último mês de pesquisa ter sido janeiro de 2025, foi selecionado um artigo publicado nesse ano.

Em relação aos periódicos que mais publicaram sobre o tema, destaca-se a revista *Building and Environment* com a maior parte (36,6%) dos artigos selecionados, seguida pela *Sustainable Cities and Society* com 10,7% e pela *Sustainability (Switzerland)*, que representa 9,2% das publicações. Um panorama do número de publicações por revista científica pode ser visto na Figura 3.

Nesse contexto, destaca-se o periódico *Building and Environment*, único com pelo menos uma publicação sobre o tema em pauta a cada dois anos, desde 2007. Já o periódico *Sustainable Cities and Society*, que tem um fator de impacto significativamente maior, tem publicado o artigo mais antigo dentro da seleção proposta neste trabalho publicado em 2017. Desde então, publicou ao menos um artigo científico por ano dentro deste escopo. O terceiro periódico mais relevante para essa RSL, *Sustainability (Switzerland)*, apesar de menos impactante que os anteriores, publica sobre o assunto desde 2015.

Figura 3 — Número de artigos por periódico.



Fonte: Autoria própria.

Em relação ao segundo questionamento de pesquisa “Quais as tendências de métodos, ferramentas e abordagens utilizados em conjunto a ACV, em estudos que objetivam atingir metas de desenvolvimento sustentável?”, foi realizada a leitura na íntegra dos artigos e levantadas as principais ferramentas e/ou métodos utilizados como complemento à ACV nos artigos selecionados. Foi encontrado que estes métodos e ferramentas variaram de acordo com a escala da avaliação de ciclo de vida proposta, conforme será discutido abaixo.

Em estudos de escala urbana (que representam 13,6% dos artigos selecionados), o método de Análise de Fluxo de Material (AFM) foi utilizado em estudos de caso em Madrid (González-García *et al.* 2021), em Santiago de Compostela (García-Guaita *et al.* 2018), e na cidade de Montreuil (Dorr *et al.* 2022), mostrando-se eficaz para uma análise de impacto ambiental satisfatória e um

método recomendado na criação de novas abordagens multicritério. Os mesmos estudos também utilizaram o conceito de Metabolismo Urbano, anteriormente explorado por Pincetl *et al.* (2014). Os *softwares* SimaPro, eLCA, LEGEP, ALCYONE, ArcGIS e COMFIE-Pleiades destacam-se como os mais utilizados para estudos nessa escala, que em sua maioria buscaram avaliar mais de uma categoria de impacto. Nessa escala, também se destaca o uso da tecnologia de Inteligência Artificial na criação de cenários para avaliação do impacto ambiental, como em Alhassan *et al.* (2024) e Jiang *et al.* (2024).

Já nos 27,3% de estudos que trabalharam na escala dos materiais, incluindo estudos de caso cujo objeto de avaliação é um componente construtivo, utilizou-se da análise estrutural e de desempenho mecânico em estudos que buscaram avaliar a energia incorporada como uma categoria de impacto (Hay e Ostertag 2018; Navarro-Rubio, Pineda e García-Martínez 2019). Alguns destes trabalhos ainda abordam aspectos sociais (Khoshnava *et al.* 2018; Rocha *et al.* 2022; Sinoh, Othman e Onn 2023) e econômicos (Khoshnava *et al.* 2018; Navarro-Rubio, Pineda e García-Martínez 2019; Rocha *et al.* 2022; Pedroso *et al.*, 2024; Akromah *et al.*, 2024) atrelados aos objetos estudados, que variaram entre materiais cimentícios convencionais a biomateriais ou sistemas híbridos.

Os resultados mostram, entretanto, que a maioria dos artigos (59,1%) se concentram na escala do edifício. Nesse caso, o método de destaque na complementação da ACV é o BIM, utilizado em estudos na Europa, Ásia e América do Norte (Basbagill *et al.* 2013; Amoruso e Schuetze 2022; Kamari, Kotula e Schultz 2022; Lu e Deng 2023; Santos *et al.* 2020; Zhu e Feng 2023; Zubair *et al.*, 2024). Entre os softwares, percebeu-se uma predominância no uso do SimaPro, que junto ao GaBi e ao OneClick LCA foram os mais utilizados para avaliação do ciclo de vida. Simulações térmicas, sísmicas e acústicas também foram utilizadas em estudos que, além de considerar aspectos ambientais, tocam em análises

econômicas (Pozza *et al.* 2021; Tavares *et al.* 2021) ou socioeconômicas (Invidiata, Lavagna e Ghisi 2018; Phillips *et al.* 2020).

De maneira geral, embora ainda não se observe uma relação direta, qualitativa e quantitativa, entre ACV de edifícios e os ODS (Backes e Traverso, 2022), a RSL demonstrou estudos de caso em diferentes escalas vem buscando associar diretamente (Bartolucci, Frasca e Bertolin, 2024; Meireles *et al.*, 2024; Bordbar *et al.* 2023; Genta *et al.* 2022; Hafner, Slabik e Storck 2020; Keles e Yazicioglu 2023; Kucukvar *et al.* 2021; Onat *et al.* 2021) ou indiretamente o ciclo de vida dos materiais, sistemas construtivos, edifícios ou até mesmo das cidades aos ODS. No entanto, existem lacunas de pesquisa no que diz respeito aos aspectos abordados por estes estudos, de modo que apenas 43 dos 131 artigos selecionados demonstram resultados baseados no tripé ambiental-social-econômico.

Adicionalmente, destacam-se as abordagens que buscam estimar impactos em outras categorias para além do potencial de aquecimento global, principalmente as que investigam a relação entre o ambiente construído e a saúde humana (González-García *et al.* 2021; Khoshnava *et al.* 2018; Kucukvar *et al.* 2021), estabelecendo relação direta com o ODS 3. Em geral, além do ODS 11, que está relacionado a todos os estudos abordados por este trabalho devido aos critérios de busca adotados, e além do ODS 3 já mencionado, foram reconhecidas contribuições do método da ACV para os ODS 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14 e 15.

Diante do exposto, foi possível elencar algumas conclusões relevantes sobre as contribuições da ACV: (i) o método vem sendo integrado na proposição de novas abordagens científicas (Chandrakumar *et al.* 2020; Pozza *et al.* 2021) e ferramentas (Arbulu, Oregi e Etxpare, 2024; Kamari, Kotula e Schultz 2022; Lu e Deng 2023; Santos *et al.* 2020) voltadas para propósitos alinhados com o desenvolvimento sustentável e metas de ação climática; (ii) a utilização da Avaliação do Ciclo de Vida como metodologia para atingir ODS mostrou-se de

relevância científica, podendo a ACV ser realizada em conjunto com outros métodos de avaliação desenvolvidos nas últimas décadas; (iii) em relação ao recorte temporal 2003-2023, à exceção do artigo de Erlandsson e Borg (2003), que tratou do estado da arte da aplicação genérica de ACV à época, é apenas a partir de 2013 que o tema começa a se apresentar mais efetivamente em número de publicações, e em diferentes periódicos, todos os anos; (iv) é possível afirmar que, dentro do escopo dos últimos cinco anos, a maioria dos estudos de ACV tem relação com mais de um objetivo de desenvolvimento sustentável, sendo os ODS 3, 11, 12 e 13 os citados mais frequentemente nos trabalhos selecionados.

Por fim, em resposta as lacunas de pesquisa encontradas, recomenda-se para estudos futuros a avaliação de edificação completa ou a inclusão de todo o ciclo de vida no escopo da ACV. Especialmente no que diz respeito ao escopo desta dissertação, destaca-se o trabalho correlato de Bartolucci, Frasca e Bertolin (2024), que também criaram indicadores de emissões de CO₂, voltados para intervenções em edifícios existentes. Na busca feita, não foram encontrados trabalhos nesse sentido para o cenário brasileiro, o que reforça a contribuição do presente trabalho. Com base nos resultados encontrados, recomenda-se, para atingir objetivos de desenvolvimento sustentável, explorar categorias de impacto para além do potencial de aquecimento global, sendo imprescindível a correlação entre as emissões de gases de efeito estufa e suas consequências socioeconômicas nos mais diversos contextos geográficos. Em especial, a aplicação da ACV em tipologias não-residenciais se destaca, incluindo estudos de caso em escritórios (Bullen *et al.* 2021; Phillips *et al.* 2020; Santos *et al.* 2020), estádios (Al-Hamrani *et al.* 2021; Kucukvar *et al.* 2021), *campi* (Leon, Oregi e Marieta 2018; Xue *et al.* 2019) ou escolas (Jang, Hong e Ji 2015).

2.3 Dificuldades da aplicação da ACV no setor da construção

A seguir, uma breve discussão é apresentada a fim de elencar as dificuldades na aplicação prática da ACV no setor da construção, inclusive por meio de ferramentas digitais, de acordo com estudos recentes.

Em um estudo de Giesekeam, Barrett e Taylor (2016), arquitetos entrevistados se queixaram da dificuldade de acesso a dados de qualidade sobre carbono incorporado dos materiais de construção, além de criticarem as bases de dados demasiadamente genéricas, como a *Inventory of Carbon and Energy* - ICE (Hammond e Jones, 2024), que, segundo eles, leva a uma abordagem rasa. Os entrevistados também antaram a divergência entre bases de dados como um fator negativo, e se posicionaram a favor de uma base de dados mais local (no caso, ao Reino Unido ou à União Europeia).

É nesse contexto que as ferramentas digitais de ACV desenvolvidas nos últimos anos passaram a se preocupar efetivamente com o nível de precisão local do país ou região em que está sendo criada (Apellániz, Pasanen e Gengnagel, 2021; Tavares, 2006). As bases de dados para DAP, elencadas na Tabela 1, auxiliam nessa questão.

Tabela 1 — Bases de dados para DAP, por país, no Brasil e na Europa.

País	Base de dados para DAP
Áustria	Baubook BauEPD
Alemanha	Okobau.dat IBU
Bélgica	B-EPD
Brasil	EPD Brasil Sidac
Dinamarca	EPD Danmark LCAbyg

(Continua na próxima página)

Espanha	GBCE AENOR BEDEC
Finlândia	CO2data RTS EPD
França	INIES
Holanda	NMD MRPI
Irlanda	IGBC
Itália	EPD Italy
Noruega	EPD Norge
Polônia	ITB
Portugal	DAP Habitat
Suécia	Boverket The international EPD System
Suíça	KBOB
Reino Unido	BECD ICE

Fonte: adaptado de Rohrmann, J. (s.d.) para adicionar informações sobre o Brasil e Espanha.

Atualmente, os *softwares* de ACV mais conhecidos, como o SimaPro, OpenLCA, GaBi e Umberto, são conectados a bases de dados existentes e podem ser utilizados para análise de impactos ambientais aplicada a diversos campos do conhecimento, com um público-alvo para além da construção civil. Deste modo, é possível atestar que há uma grande diversidade de produtos e informações para modelagem de ACV fora do escopo de uma edificação - ou parte dela -, o que complexifica o aprendizado e a adoção das ferramentas. Além disso, destaca-se novamente que muitas bases de dados incorporadas aos programas são genéricas, resultando no emprego de dados quantitativos incompatíveis com a realidade local de um determinado cenário no qual se aplica a ACV, e, consequentemente, estimativa de impactos equivocadas (Carvalho, 2020).

Uma outra desvantagem é a usual necessidade de instalação do *software* e a dependência de extração de dados ou importação de modelos de outros programas. É o caso da ferramenta de ACV criada por Apellániz (2021), que consiste em incorporar *plugins* do *software OneClickLCA* para as interfaces do

Rhino e *Grasshopper*. Diversas outras ferramentas que combinam ACV e BIM por meio de plugins, como a Tortuga, a Bombyx e a CAALA utilizam dados específicos de uma das bases de dados apresentadas na Tabela 1, o que permite uma avaliação de impacto mais precisa.

O custo anual das principais ferramentas digitais para ACV são apresentados na Tabela 2. Observa-se que o custo de instalação desses programas é elevado e, em sua maioria, em dólares ou euros, visto que são distribuídos por empresas da América do Norte e Europa (Caldas, Carvalho e Toledo Filho, 2020).

Tabela 2 — Custos dos programas computacionais para ACV, considerando licenças com renovação anual.

Custo de programas computacionais para ACV		
Programa computacional	Versão	Preço original
SimaPro	<i>Expert plan</i> (uso profissional)	€ 6.100,00/ano*
SimaPro	<i>PhD</i> (uso educacional)	€ 2.000,00/ano*
GaBi	<i>GaBi Professional Academy</i>	U\$D 2225,14/ano*
OpenLCA	<i>OpenLCA 1.9</i>	Gratuito
Tally	<i>Floating Basic License</i>	U\$D 695,00/ano*
	Licença educacional	Disponível sob solicitação
Ecoinvent	<i>Commercial</i>	€ 3.800,00 no primeiro ano e € 750,00/ano do segundo ano em diante*
Ecoinvent	<i>Educational</i>	€ 3.800,00 no primeiro ano e € 750,00/ano do segundo ano em diante*

*Entre R\$ 4.097,03 e R\$ 37.771,20 ao ano, considerando a cotação do dia 24/01/2025 para o euro (R\$ 6,192) e para o dólar (R\$ 5,896). Fonte: Pesquisa online no site das empresas dos programas, com exceção do valor do GaBi que foi retirado de Caldas, Carvalho e Toledo Filho (2020).

Além do custo, a associação da ACV com esses programas em modelo BIM, como é o caso do Tally (AUTODESK, 2023) pode não ser tão benéfica para a tomada de decisão em fases iniciais de projeto, visto que um modelo completo em BIM geralmente só fica pronto nas fases finais do processo projetual, quando

não há mais tanta abertura para mudanças no desenho e planejamento da construção (Apellániz, 2021). Por outro lado, essa integração possibilita uma avaliação ambiental mais automatizada (Di Bari, 2022; Apellániz, 2021), podendo ser utilizada no final do processo de projeto para avaliações mais completas.

Uma revisão de ferramentas de ACV selecionadas é apresentada na Tabela 3, mostrando que, apesar da literatura apontar a grande importância das avaliações ambientais nas fases iniciais de projeto, a maioria das ferramentas disponíveis foram pensadas para estágios mais avançados. Além disso, muitas das ferramentas não tem como público-alvo os responsáveis pela tomada de decisão nos projetos e/ou não possibilitam a comparação de alternativas projetuais (Hollberg *et al.*, 2021).

Tabela 3 — Uma seleção de ferramentas de ACV existentes e seus recursos.

Ferramentas de ACV existentes	Fases iniciais de projeto	Tomada de decisão	Comparação
A Carbon Tool (ACT)	Não	Não	Não
ArchiWIZARD	Sim	Não	Não
Athena EcoCalculator	Sim	Não	Não
Bauteileditor (eLCA)	Não	Não	Não
BHoM	Sim	Não	Não
Bombyx	Sim	Não	Não
CAALA	Sim	Sim	Não
LCAByg	Não	Não	Não
OneClickLCA	Sim	Não	Sim
Reduzer	Não	Não	Sim
Tally	Não	Não	Não
B+G Structural Web Tool	Sim	Sim	Sim

Fonte: Hollberg *et al.* (2021) e Rohrmann [s.d.], com adição da B+G Structural Web Tool.

De modo geral, uma possível solução para alguns dos problemas apontados neste item é a categorização da ACV por níveis de detalhe proposta por Lasvaux *et al.* (2013), que foram pioneiros na recomendação de práticas para uma nova geração de ferramentas de ACV. Os autores determinaram três possíveis níveis de avaliação: *screening assessment*, *simplified assessment* e *complete*

assessment. Os três níveis diferem em método de cálculo e no tipo de dado utilizado - o *complete assessment* requer dados específicos, enquanto nos outros níveis podem ser utilizados dados genéricos. Os autores especificam as diferenças entre os três níveis para avaliação de água e energia operacionais, enquanto para a avaliação dos impactos dos materiais de construção e equipamento técnico são considerados apenas dois níveis de detalhamento. As maiores diferenças entre os níveis de detalhamento são a especificidade dos dados de ACV e a definição do escopo.

O presente capítulo apresentou a relevância da ACV para o desenvolvimento sustentável, as possibilidades de seu uso aliado a diversos tipos de ferramentas, bem como as dificuldades enfrentadas por profissionais na aplicação prática da ACV, demonstrando que:

- (i) a crescente digitalização da arquitetura tem facilitado a aplicação da ACV em estudos de caso, inclusive com auxílio de ferramentas digitais;
- (ii) a criação de novas abordagens envolvendo ACV, incluindo simplificações para cenários mais específicos através da criação de indicadores ou ferramentas digitais, é um tema que vem crescendo na literatura científica dos últimos anos, como demonstrou a RSL feita;
- (iii) ferramentas digitais que surgiram para simplificar a aplicação da ACV são caras, complexas e, muitas vezes, alimentados por bases de dados genéricas, podendo gerar resultados insatisfatórios;

Nesse sentido, os dados apresentados reforçam a relevância do presente estudo e a abordagem teórica adotada na pesquisa. É nesse contexto que a metodologia apresentada no Capítulo 3 foi proposta, buscando aprofundar a

discussão acerca de indicadores de impacto em cenários específicos no Brasil, utilizando dados atualizados, e discutir as possibilidades de simplificação das ferramentas digitais para estimativa de CO₂, tendo em vista as dificuldades apontadas em 2.3.

Referências do capítulo

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12721**: Avaliação de custos unitários de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edifícios – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006. 91 p. Versão corrigida em janeiro de 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009. 21 p. Versão corrigida em julho de 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009. 46 p. Versão corrigida em julho de 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT ISO/TR 14049**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 à definição de objetivo e escopo e à análise de inventário. Rio de Janeiro, 2014. 53 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT ISO/TS 14072**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e diretrizes para a avaliação do ciclo de vida organizacional. Rio de Janeiro, 2019. 29 p.

AKROMAH, Stefania; CHANDARANA, Neha; ROWLANDSON, Jemma L.; EICHHORN, Stephen J. Potential environmental impact of mycelium composites on African communities. **Scientific reports**, v. 14, n. 1, dez. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62561-7>. Acesso em: 6 fev. 2025.

ALMEIDA, Raíssa; CHAVES, Livia; SILVA, Matheus; CARVALHO, Michele; CALDAS, Lucas. Integration between BIM and EPDs: Evaluation of the main difficulties and proposal of a framework based on ISO 19650:2018. **Journal of Building Engineering**, v. 68, art. 106091, jun. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106091>. Acesso em: 21 jan. 2025.

AL-HAMRANI, Abathar; KIM, Doyoon; KUCUKVAR, Murat; ONAT, Nuri Cihat. Circular economy application for a Green Stadium construction towards sustainable FIFA world cup Qatar 2022TM. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 87, art. 106543, mar. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106543>. Acesso em: 22 jan. 2025.

ALHASSAN, Mohammad; ALKHAWALDEH, Ayah; BETOUSH, Nour; SAWALHA, Ansam; AMAIREH, Layla; ONAIZI, Ali. Harmonizing smart Technologies with Building resilience and sustainable built environment systems. **Results in Engineering**, v. 22, art. 102158, jun. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102158>. Acesso em: 6 fev. 2025.

AMORUSO, Fabrizio M.; SCHUETZE, Thorsten. Life cycle assessment and costing of carbon neutral hybrid-timber building renovation systems: Three applications in the Republic of Korea. **Building and Environment**, v. 222, art. 109395, ago. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109395>. Acesso em: 20 jan. 2025.

ANAND, Chirjiv Kaur; AMOR, Ben. Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 67, p. 408–416, jan. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.058>. Acesso em: 20 jan. 2025.

APELLÁNIZ, Diego; PASANEN, Panu; GENGNAGEL, Christoph. A Holistic and Parametric Approach for Life Cycle Assessment in the Early Design Stages. In: ANNUAL SYMPOSIUM ON SIMULATION FOR ARCHITECTURE AND URBAN DESIGN (SIMAUD), 12., 2021, [online]. **Proceedings of the 12th Annual Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design**. San Diego: Society for Computer Simulation International, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/354193697_A_Holistic_and_Parametric_Approach_for_Life_Cycle_Assessment_in_the_Early_Design_Stages. Acesso em: 20 jan. 2025.

ARBULU, Markel; OREGI, Xabat; ETXEPARE, Lauren. Parametric simulation tool for the enviro-economic evaluation of energy renovation strategies in residential buildings with life cycle thinking: PARARENOVATE-LCT. **Energy and Buildings**, v. 321, art. 114182, jun. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114182>. Acesso em: 6 fev. 2025.

AUTODESK. Tally: versão 4.2. [S.l.]: Autodesk, 2023. Disponível em: <https://apps.autodesk.com/RVT/en/Detail/Index?id=3841858388457011756>. Acesso em: 21 jan. 2025.

BAI, Chunguang; DALLASEGA, Patrick; ORZES, Guido; SARKIS, Joseph. Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective. **International Journal of Production Economics**, v. 229, art. 107776, nov. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107776>. Acesso em: 21 jan. 2025.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. Programa Minha Casa Minha Vida. Caixa Econômica Federal, [2025]. Disponível em: <https://www.caixa.gov.br/voce/habitacao/minha-casa-minha-vida/Paginas/default.aspx>. Acesso em: 21 jan. 2025.

BACKES, Jana Gerta; TRAVERSO, Marzia. Life Cycle Sustainability Assessment – A Survey Bases Potential Future Development for Implementation and Interpretation. **Sustainability**, v. 13, n. 24, art. 13688, dez. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su132413688>. Acesso em: 20 jan. 2025.

BAMB 2020. Building as Material Banks. **BAMB 2020**, [2025]. Disponível em: <https://www.bamb2020.eu/>. Acesso em: 22 jan. 2025.

BARBIERI, José Carlos. **Desenvolvimento sustentável: das origens à agenda 2030**. 1ª ed. Petrópolis: Editora Vozes, 2020.

BARTOLUCCI, Beatrice; FRASCA, Francesca; BERTOLIN, Chiara. LCA- and nZER-based methodology for identifying optimal low environmental impact interventions for existing buildings. **Energy for Sustainable Development**, v. 82, art. 101543, out. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2024.101543>. Acesso em: 6 fev. 2025.

BASBAGILL, John Paul; FLAGGER, Forest Lee; LEPECH, Michael D.; FISCHER, Martin Arthur. Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts. **Building and Environment**, v. 60, p. 81- 92, fev. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.009>. Acesso em: 21 jan. 2025.

BOFF, Leonardo. **Sustentabilidade: o que é – o que não é**. 2ª ed. São Paulo: Editora Senac, 2017.

BOMBYX. Bombyx: versão 1.1. [S.l.]: Bombyx, [2025].

BORDBAR, Benyamin; KHOSRAVI, Arash; ABDOLLAHI, Farideh; HASHEMIFARD, Seyyed Abdollatif; KARAGÖZ, Seçkin. An insight into environmental footprints of emerging air-conditioning systems towards sustainable cities. **Sustainable Cities and Society**, v. 98, p. 104830, nov. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104830>. Acesso em: 21 jan. 2025.

BREEAM. BREEAM: the world's leading sustainability assessment method for masterplanning projects, infrastructure and buildings. Watford: BRE Group, [2025]. Disponível em: <https://breeam.com/>. Acesso em: 20 jan. 2025.

BULLEN, L.; MCLAREN, S. J.; DOWDELL, D.; CHANDRAKUMAR, C. Absolute sustainability of New Zealand office buildings in the context of climate targets. **Building and Environment**, v. 205, art. 108186, nov. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108186>. Acesso em: 22 jan. 2025.

BUYLE, Matthias; BRAET, Johan; AUDENAERT, Amaryllis. Life cycle assessment in the construction sector: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 26, p. 379-388, out. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.001>. Acesso em: 22 jan. 2025.

CAALA. Caala: versão 4.5. Hamburgo: CAALA, [2025].

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. Selo Casa Azul Caixa: construções habitacionais sustentáveis. Brasília: Caixa Econômica Federal, 2009.

CALDAS, Lucas Rosse; CARVALHO, Michele Tereza Marques; TOLEDO FILHO, Romildo Dias. Inserção da ACV no processo de projeto de edificações: avaliação de alternativas e ferramentas computacionais para a prática de mercado. **Paranoá**, Brasília, n. 28, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/SDTCjgdSggYJzTFps5hkTcC/?format=pdf>. Acesso em: 20 jan. 2025.

CALDAS, Lucas Rosse; SILVA, Maykon Vieira; SILVA, Vitor Pereira; CARVALHO, Michele Tereza Marques; TOLEDO FILHO, Romildo Dias. How Different Tools Contribute to Climate Change Mitigation in a Circular Building Environment? — A Systematic Literature Review. **Sustainability**, v. 14, n. 7, art. 3759, mar. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su14073759>. Acesso em: 20 jan. 2025.

CARVALHO, Tathiana do Nascimento. Diretrizes da avaliação do ciclo de vida aplicadas à tomada de decisões em projeto. In: SALGADO, Mônica Santos; SILVOSO, Marcos Martinez; GRABOIS, Thiago Melo. **Arquitetura, Materialidade e Tecnologias Digitais: Aplicações na produção e conservação do ambiente construído**. Rio de Janeiro: PROARQ-FAU/UFRJ, Paisagens Híbridas, 2020.

CECARBON. Ferramenta para estimativa da emissão de carbono. São Paulo: Sinduscon-SP [2025]. Disponível em: <https://www.cecarbon.com.br/>. Acesso em: 21 jan. 2025.

CHANDRAKUMAR, Chanjief; MCLAREN, Sarah J.; DOWDELL, David; JAQUES, Roman. A science-based approach to setting climate targets for buildings: The case of a New Zealand detached house. **Building and Environment**, v. 169, art.

106560, fev. 2020. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106560>. Acesso em: 22 jan. 2025.

COLANGELO, Francesco; CIOFFI, Raffaele; FARINA, Ilenia (Ed.). **Handbook of sustainable concrete and industrial waste management: recycled and artificial aggregate, innovative eco-friendly binders, and life cycle assessment**. Woodhead Publishing, 2021.

COLANGELO, Francesco; NAVARRO, Tomás Gómez; FARINA, Ilenia; PETRILLO, Antonella. Comparative LCA of concrete with recycled aggregates: A circular economy mindset in Europe. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, p. 1790-1804, ago. 2020. Disponível em:
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-020-01798-6>. Acesso em: 22 jan. 2025.

COSTA, Bruno Luis de Carvalho; CARVALHO, Fernanda Magalhães de Souza; ALVES, Natana Janiele Nobre. Uso de materiais menos impactantes ambientalmente nos selos de edificações. In: ENCONTRO LATINO-AMERICANO E EUROPEU SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 4., 2021, [online]. **Anais do IV Encontro Latino-americano e Europeu sobre edificações e comunidades sustentáveis**. Salvador: UFBA, 2021. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/363138286_Uso_de_materiais_menos_impactantes_ambientalmente_nos_selos_de_edificacoes. Acesso em: 20 jan. 2025.

COSTA, Bruno Luis de Carvalho. Quantificações das Emissões de CO₂ Geradas na Produção de Materiais Utilizados na Construção Civil no Brasil. 2012. 208 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em:
<http://www.coc.ufrj.br/pt/dissertacoes-de-mestrado/112-msc-pt-2012/2251-bruno-luis-de-carvalho-da-costa>. Acesso em: 20 jan. 2025.

DERVISHAJ, Arlind; GUDMUNDSSON, Kjartan. From LCA to circular design: A comparative study of digital tools for the built environment. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 200, art. 107291, jan. 2024. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107291>. Acesso em: 21 jan. 2025.

DGNB – DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR NACHHALTIGES BAUEN. DGNB: The German Sustainable Building Council. Stuttgart: DGNB, 2009. Disponível em:
<https://www.dgnb.de/en/>. Acesso em: 20 jan. 2025.

DI BARI, Roberta; HORN, Rafael; BRUHN, S.; ALAUX, Nicolar; SAADE, Marcella Ruschi Mendes; SOUST-VERDAGUER, Bernardette; OBRECHT, Tajda Potrc; HOLLBERG, Alexander; BIRGISDOTTIR, Harpa; PASSER, Alexandre; FRISCHKNECHT, Rolf. Buildings LCA and digitalization: Designers' toolbox based on a survey. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 1078, art. 012092, set. 2022. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1078/1/012092>. Acesso em: 20 jan. 2025.

DORR, Erica; FRANÇOIS, Cyrille; POULHÈS, Alexis; WURTZ, Aurore. A life cycle assessment method to support cities in their climate change mitigation strategies. **Sustainable Cities and Society**, v. 85, art. 104052, out. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104052>. Acesso em: 21 jan. 2025.

eLCA. **eLCA**. Berlim: Federal Institute for Research on Building, Urban Affairs and Spatial Development, [2025]. Disponível em: <https://www.bauteileditor.de/>. Acesso em: 22 jan. 2025.

ERLANDSSON, Martin; BORG, Mathias. Generic LCA-methodology applicable for buildings, constructions and operation services—today practice and development needs. **Building and Environment**, v. 38, n. 7, p. 919-938, jul. 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(03\)00031-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00031-3). Acesso em: 22 jan. 2025.

ESRI. **ArcGIS: sistema de informações geográficas**. Redlands, CA: Esri, [s.d.]. Disponível em: <https://www.esri.com/arcgis/>. Acesso em: 22 jan. 2025.

FUNDAÇÃO VANZOLINI. AQUA-HQE: Alta Qualidade Ambiental. São Paulo: Fundação Vanzolini, 2008. Disponível em: <https://www.vanzolini.org.br/aqua-hqe/>. Acesso em: 20 jan. 2025.

FUNDAÇÃO VANZOLINI. EPD Brasil: programa brasileiro de declarações ambientais de produto. São Paulo: Fundação Vanzolini, 2024. Disponível em: <https://www.epdbrasil.com.br/>. Acesso em: 22 jan. 2025.

GARCÍA-GUAITA, Fernando; GONZÁLEZ-GARCÍA, Sara; VILLANUEVA-REY, Pedro; MOREIRA, María Teresa; FEIJOO, Gumersindo. Integrating Urban Metabolism, Material Flow Analysis and Life Cycle Assessment in the environmental evaluation of Santiago de Compostela. **Sustainable Cities and Society**, v. 40, p. 569–580, jul. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.04.027>. Acesso em: 22 jan. 2025.

GENTA, Chiara; SANYÉ-MENGUAL, Esther; SALA, Serenella; LOMBARDI, Patrizia. The Consumption Footprint as possible indicator for environmental impact evaluation at city level. The case study of Turin (Italy). **Sustainable Cities and Society**, v. 79, art. 103679, abr. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103679>. Acesso em: 22 jan. 2025.

GIAVENO, Sara; OSELLO, Anna; GARUFI, Davide; RAZO, Diego Santamaria. Embodied Carbon and Embodied Energy Scenarios in the Built Environment. Computational Design Meets EPDs. **Sustainability**, v. 13, n. 21, art. 11974, out. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su132111974>. Acesso em: 20 jan. 2025.

GIESEKAM, Jannik; BARRETT, John; TAYLOR, Peter. Construction sector views on low carbon building materials. **Building Research & Information**, v. 44, n. 4, p. 423–444, 7 out. 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/282776219_Construction_sector_views_on_low_carbon_building_materials. Acesso em: 21 jan. 2025.

GOMES, Vanessa; BARROS, Natalia Nakamura. Contribuição da modelagem BIM para facilitar o processo de ACV de edificações completas. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 13, n. 2, p. 19-34, 2018.

GONZÁLEZ-GARCÍA, Sara; CAAMAÑO, Manuel Roma; MOREIRA, María Teresa; FEIJOO, Gumersindo. Environmental profile of the municipality of Madrid through the methodologies of Urban Metabolism and Life Cycle Analysis. **Sustainable Cities and Society**, v. 64, art. 102546, jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102546>. Acesso em: 22 jan. 2025.

GREEN BUILDING COUNCIL AUSTRALIA. Green Star: driving the transition to a sustainable built environment. Sydney: GBCA, 2006. Disponível em: <https://www.gbca.org.au/>. Acesso em: 20 jan. 2025.

GREEN BUILDING COUNCIL ITALIA. GBC Casa: il protocollo per la sostenibilità edilizia residenziale. [S.l.]: GBC Italia, 2014. Disponível em: <https://www.gbcaitalia.org/>. Acesso em: 20 jan. 2025.

GREENDELTA. OpenLCA: versão 1.10. Berlim: GreenDelta, [2025]. Disponível em: <https://www.openlca.org/>. Acesso em: 21 jan. 2025.

HAFNER, Annette; SLABIK, Simon; STORCK, Michael. Urban Site Development as Temporal Carbon Storage—A Case Study in Germany. **Sustainability**, v. 12, n. 14,

art. 5827, jul. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su12145827>. Acesso em: 21 jan. 2025.

HAY, Rotana; OSTERTAG, Claudia P. Life cycle assessment (LCA) of double-skin façade (DSF) system with fiber-reinforced concrete for sustainable and energy-efficient buildings in the tropics. **Building and Environment**, v. 142, p. 327–341, set. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.06.024>. Acesso em: 20 jan. 2025.

HAMMOND, G.; JONES, C. Inventory of carbon and energy (ICE). Bath: Circular Ecology, 2024. Disponível em: <https://circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html>. Acesso em: 21 jan. 2025.

HAO, Jian Li; CHENG, Baoquan; LU, Weisheng; XU, Jun; WANG, Junjie; BU, Weicheng; GUO, Zhiping. Carbon emission reduction in prefabrication construction during materialization stage: A BIM-based life-cycle assessment approach. **Science of the Total Environment**, v. 723, p. 137870, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137870>. Acesso em: 22 jan. 2025.

HOLLBERG, Alexander; KISS, Benedek; RÖCK, Martin; SOUST-VERDAGUER, Bernardette; WIBERG, Aoife Houlihan; LASVAUX, Sabastien; GALIMSHINA, Alina; HABERT, Guillaume. Review of visualising LCA results in the design process of buildings. **Building and Environment**, v. 190, art. 107530, mar. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107530>. Acesso em: 20 jan. 2025.

HONIC, Meliha; KOVACIC, Iva; RECHBERGER, Helmut. Improving the recycling potential of buildings through Material Passports (MP): An Austrian case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 217, p. 787-797, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.212>. Acesso em: 22 jan. 2025.

HOOSAIN, Mohamed Sameer; PAUL, Babu Sena; RAZA, Syed Mehdi; RAMAKRISHNA, Seeram.

HQE ASSOCIATION. HQE: Haute Qualité Environnementale. [S.l.]: HQE Association, 2004. Disponível em: <https://www.hqegbc.org/>. Acesso em: 20 jan. 2025.

IBEC – INSTITUTE FOR BUILDING ENVIRONMENT AND ENERGY CONSERVATION. CASBEE: Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency. Tóquio: IBEC, 2004. Disponível em: <https://www.ibec.or.jp/CASBEE/english/>. Acesso em: 20 jan. 2025.

IFC – INTERNATIONAL FINANCE CORPORATION. EDGE: Excellence in Design for Greater Efficiencies. Washington, D.C.: IFC, 2014. Disponível em: <https://www.edgebuildings.com/>. Acesso em: 20 jan. 2025.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14025:** Environmental labels and declarations — Type III environmental declarations — Principles and procedures. Geneva, 2006. Versão corrigida em 2020.

IFU. Umberto: versão 12. Nördlingen: IFU Hamburg GmbH, [2025]. Disponível em: <https://www.ifu.com/>. Acesso em: 21 jan. 2025.

INVIDIATA, Andrea; LAVAGNA, Monica; GHISI, Enedir. Selecting design strategies using multi-criteria decision making to improve the sustainability of buildings. **Building and Environment**, v. 139, p. 58–68, jul. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.04.041>. Acesso em: 21 jan. 2025.

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. Geneva: IPCC, 2023, p. 1-34. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf. Acesso em: 21 jan. 2025.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 21930:** Sustainability in buildings and civil engineering works — Core rules for environmental product declarations of construction products and services. Geneva, 2007. Versão corrigida em 2023.

IZUBA ENERGIES. **COMFIE-Pleiades: software de simulação de conforto térmico e energético**. [S.l.]: Izuba Energies, [s.d.].

JANG, Minho; HONG, Taehoon; JI, Changyoon. Hybrid LCA model for assessing the embodied environmental impacts of buildings in South Korea. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 50, p. 143-155. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2014.09.010>. Acesso em: 22 jan. 2025.

JIANG, Gang; ZUO, Lanlan; ASUTOSH, Ashish T.; ZHANG, Junxue. Environmental Sustainability Study of Urban Waterfront Landscapes Based on the LCA–Emergy–Carbon Footprint and Artificial Neural Network Method. **Buildings**, v. 14, n. 2,

fev. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings14020386>. Acesso em: 6 fev. 2025.

JURASCHEK, Max; BÜTH, Lennart; CERDAS, Felipe; KALUZA, Alexander; THIEDE, Sebastian; HERRMANN, Christoph. Exploring the Potentials of Mixed Reality for Life Cycle Engineering. **Procedia CIRP**, v. 69, abr. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.123>. Acesso em: 20 jan. 2025.

KIBERT, Charles J. **Edificações Sustentáveis: Projeto, Construção e Operação**. 4ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2020.

KAMARI, Aliakbar; KOTULA, Bartłomiej Marek; SCHULTZ, Carl Peter Leslie. A BIM-based LCA tool for sustainable building design during the early design stage.

Smart and Sustainable Built Environment, v. 11, n. 2, p. 217–244, jul. 2022.

Disponível em: <http://doi.org/10.1108/SASBE-09-2021-0157>. Acesso em: 20 jan. 2025.

KELES, Cagla; YAZICIOGLU, Fatih. Analyzing the environmental sustainability of primary schools' facades within the scope of life cycle assessment in Turkey and recommendations for improvement. **Smart and Sustainable Built Environment**, v. 12, n. 2, fev. 2023. Disponível em:

<https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/sasbe-04-2021-0072/full/html>. Acesso em: 22 jan. 2025.

KHOSHNAVA, Seyed Meysam; ROSTAMI, Raheleh; ISMAIL, Mohammad; RAHMAT, Abdul Razak. A cradle-to-gate based life cycle impact assessment comparing the KBFw EFB hybrid reinforced poly hydroxybutyrate biocomposite and common petroleum-based composites as building materials. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 70, p. 11–21, maio 2018. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2018.02.002>. Acesso em: 22 jan. 2025.

KUCUKVAR, Murat; KUTTY, Adeeb A.; AL-HAMRANI, Abathar; KIM, Doyoon; NOFAL, Nadejhda; ONAT, Nuri Cihat; ERMOLAEVA, Polina; AL-ANSARI, Tareq; AL-THANI, Soud Khalifa; AL-JURF, Nasser Mohammed; BULU, Melih; AL-NAHHAL, Wael. How circular design can contribute to social sustainability and legacy of the FIFA World Cup Qatar 2022™? The case of innovative shipping container Stadium. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 91, art. 106665, nov. 2021.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106665>. Acesso em: 22 jan. 2025.

LASVAUX, Sébastien; GANTNER, Johannes; SCHIOPU, Nicoleta; NIBEL, Sylviane; BAZZANA, Manuel; BOSDEVIGIE, Boris; SIBIUDE, Galdric. Towards a new generation of building LCA tools adapted to the building design process and to

the user needs. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE BUILDINGS, CONSTRUCTION PRODUCTS AND TECHNOLOGIES (SB13), 13., Graz. **Proceedings of the International Conference on Sustainable Buildings, Construction products and Technologies (SB13)**. Graz: T.U. Graz, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/260988823_Towards_a_new_generation_of_building_LCA_tools_adapted_to_the_building_design_process_and_to_the_user_needs. Acesso em: 20 jan. 2025.

LEGENSTEIN, Philipp. **Legep: software de planejamento para edificações sustentáveis**. [S.l.]: [s.n.], [s.d.]. Disponível em: <https://www.legep.de/>. Acesso em: 22 jan. 2025.

LEON, Iñigo; OREGI, Xabat; MARIETA, Cristina. Environmental assessment of four Basque University campuses using the NEST tool. **Sustainable Cities and Society**, v. 42, p. 396-406, out. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.08.007>. Acesso em: 22 jan. 2025.

LU, Kun; DENG, Xueyuan. OpenBIM-based assessment for social cost of carbon through building life cycle. **Sustainable Cities and Society**, v. 99, art.104871, dez. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104871>. Acesso em: 21 jan. 2025.

LU, Yujie; WU, Zhilei; CHANG, Ruidong; LI, Yongkui. Building Information Modeling (BIM) for green buildings: A critical review and future directions. **Automation in Construction**, v. 83, p. 134-148, nov. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.024>. Acesso em: 22 jan. 2025.

MEIRELES, Inês; MARTÍN-GAMBOA, Mario; SOUSA, Vitor; KALTHOUM, Ahmad; DUFOUR, Javier. Comparative environmental life cycle assessment of partition walls: Innovative prefabricated systems vs conventional construction. **Cleaner Environmental Systems**, v. 12, art. 100179, mar. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2024.100179>. Acesso em: 6 fev. 2025.

MUNARO, M. R.; FISCHER, A.C.; AZEVEDO, N.C.; TAVARES, S.F. Proposal of a building material passport and its application feasibility to the *wood frame* constructive system in Brazil. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2019, art. 012018. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/225/1/012018/pdf>. Acesso em: 22 jan. 2025.

NAÇÕES UNIDAS. Acordo de Paris. Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Paris, 12 dez. 2015 (vigente a partir de 4 nov. 2016).

Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>. Acesso em: 21 jan. 2025.

NAÇÕES UNIDAS. Agenda 21. [S.l.]: Nações Unidas, 1992. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/Agenda21.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2025.

NAÇÕES UNIDAS. Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (ECO-92). Rio de Janeiro, 1992. Disponível em: <https://www.un.org/en/conferences/environment/rio1992>. Acesso em: 22 jan. 2025.

NAÇÕES UNIDAS. Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano (CNUMAH). Estocolmo, 1972. Disponível em: <https://www.un.org/en/conferences/environment/stockholm1972>. Acesso em: 22 jan. 2025.

NAÇÕES UNIDAS. Nosso futuro comum: relatório da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (Comissão Brundtland). [S.l.]: Nações Unidas, 1987. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2025.

NAÇÕES UNIDAS. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: conheça os 17 objetivos para transformar nosso mundo. [S.l.]: Nações Unidas, [s.d.]. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 22 jan. 2025.

NAÇÕES UNIDAS. Objetivos de Desenvolvimento do Milênio: relatório de 2015. [S.l.]: Nações Unidas, 2015. Disponível em: <https://www.un.org/millenniumgoals/>. Acesso em: 22 jan. 2025.

NAÇÕES UNIDAS. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). Nairobi: UNEP, [s.d.]. Disponível em: <https://www.unep.org/>. Acesso em: 22 jan. 2025.

NAÇÕES UNIDAS. Protocolo de Kyoto à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Quioto, 1997. Disponível em: https://unfccc.int/kyoto_protocol. Acesso em: 22 jan. 2025.

NAÇÕES UNIDAS. Resolução sobre a Primeira Década do Desenvolvimento das Nações Unidas. Resolução nº 1710 (XVI), 19 dez. 1961. Disponível em: [https://undocs.org/Home/Mobile?FinalSymbol=A%2FRES%2F1710%2520\(XVI\)&La](https://undocs.org/Home/Mobile?FinalSymbol=A%2FRES%2F1710%2520(XVI)&La)

[nguage=E&DeviceType=Desktop&LangRequested=False](#). Acesso em: 24 jan. 2025.

NAVARRO-RUBIO, Jorge; PINEDA, Paloma; GARCÍA-MARTÍNEZ, Antonio. Sustainability, prefabrication and building optimization under different durability and re-using scenarios: potential of dry precast structural connections. **Sustainable Cities and Society**, v. 44, p. 614–628, jan. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.045>. Acesso em: 22 jan. 2025.

NUßHOLZ, Julia LK; RASMUSSEN, Freja Nygaard; MILIOS, Leonidas. Circular building materials: Carbon saving potential and the role of business model innovation and public policy. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 141, p. 308-316, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.036>. Acesso em: 22 jan. 2025.

ONAT, Nuri Cihat; ABDELLA, Galal M.; KUCUKVAR, Murat; KUTTY, Adeeb; AL-NUAIMI, Munera; KUMBAROGLU, Gürkan; BULU, Melih. How eco-efficient are electric vehicles across Europe? A regionalized life cycle assessment-based eco-efficiency analysis. **Sustainable Development**, v. 29, n. 5, p. 941–956, set. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/sd.2186>. Acesso em: 22 jan. 2025.

ONECLICK LCA. OneClick LCA: versão 2023. Helsinque: OneClick LCA, [2025]. Disponível em: <https://www.oneclicklca.com/>. Acesso em: 21 jan. 2025.

ORLANDINI, Luana Caroline; PUNHAGUI, Katia Regina Garcia. Strategies to reduce CO2 emissions and increase temporary carbon stock in Brazilian housing using planted wood. **Environmental Developmet**, v. 49, art. 100946, mar. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2023.100946>. Acesso em: 20 jan. 2025.

PEDROSO, Pedro Frazão; CORREIA, João R.; SILVESTRE, José D.; FIRMO, João P.; GARRIDO, Mário. Environmental and Economic LCA Comparison of Flexural Strengthening Solutions for a Reinforced Concrete Beam. **Materials**, v. 17, n. 13, nov. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma17235879>. Acesso em: 6 fev. 2025.

PHILLIPS, Robert; TROUP, Luke; FANNON, David; ECKELMAN, Matthew J. Triple bottom line sustainability assessment of window-to-wall ratio in US office buildings. **Building and Environment**, v. 182, art. 107057, set. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107057>. Acesso em: 21 jan. 2025.

POZZA, Luca; ESPOSTI, Anna Degli; BONOLI, Alessandra; TALLEDO, Diego; BARBARESI, Luca; SEMPRINI, Giovanni; SAVOIA, Marco. Multidisciplinary Performance Assessment of an Eco-Sustainable RC-Framed Skin for the Integrated Upgrading of Existing Buildings. **Sustainability**, v. 13, n. 16, art. 9225, ago. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13169225>. Acesso em: 21 jan. 2025.

PRÉ SUSTAINABILITY. SimaPro: versão 9.1. Amsterdã: PRé Sustainability, [2025]. Disponível em: <https://simapro.com/>. Acesso em: 21 jan. 2025.

RHINO3D. Grasshopper: versão 1.0. Seattle: Robert McNeel & Associates, 2023. Disponível em: <https://www.grasshopper3d.com/>. Acesso em: 21 jan. 2025.

RHINO3D. Rhino: versão 7. Seattle: Robert McNeel & Associates, 2023. Disponível em: <https://www.rhino3d.com/>. Acesso em: 21 jan. 2025.

ROCHA, Joaquin Humberto Aquino; SIQUEIRA, Andréia Arenari de; OLIVEIRA, Marco Antonio Barbosa de; CASTRO, Lucas da Silva; CALDAS, Lucas Rosse Caldas; MONTEIRO, Nathalie Barbosa Reis; TOLEDO FILHO, Romildo Dias. Circular Bioeconomy in the Amazon Rainforest: Evaluation of Açaí Seed Ash as a Regional Solution for Partial Cement Replacement. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 21, art. 14436, nov. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su142114436>. Acesso em: 22 jan. 2025.

RÖCK, Martin; PASSER, A.; RAMON, D.; ALLACKER, K. The coupling of BIM and LCA – Challenges identified through case study implementation. In: CASPEELE, Robby; TAERWE, Luc; FRANGOPOL, Dan. **Life Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering: Towards an Integrated Vision**. London: CRC Press, 2018, p. 841-846.

RÖCK, Martin; SAEDE, Marcella Ruschi Mendes; BALOUKTSI, Maria; RASMUSSEN, Freja Nygaard; BIRGISDOTTIR, Harpa; FRISCHKNECHT, Rolf; HABERT, Guillaume; LÜTZKENDORF, Thomas; PASSER, Alexander. Embodied GHG emissions of buildings–The hidden challenge for effective climate change mitigation. **Applied energy**, v. 258, p. 114107, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114107>. Acesso em: 22 jan. 2025.

SALGADO, Mônica Santos. Tecnologias digitais, pandemia e sustentabilidade nas “smart cities”. In: SALGADO, Mônica Santos; SILVOSO, Marcos Martinez, GRABOIS, Thiago Melo. **Arquitetura, Materialidade e Tecnologias Digitais: Aplicações na produção e conservação do ambiente construído**. Rio de Janeiro: PROARQ-FAU/UFRJ, Paisagens Híbridas, 2020.

SANTOS, Rúben; COSTA, António Aguiar; SILVESTRE, José Diniz; VANDENBERGH, Thomas; PYL, Lincy. BIM-based life cycle assessment and life cycle costing of an office building in Western Europe. **Building and Environment**, v. 169, art. 106568, fev. 2020. Disponível em: <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106568>. Acesso em: 21 jan. 2025.

SINOH, Hanis Hidayah; OTHMAN, Mohd Farid; ONN, Chiu Chuen. Circular economy potential of sustainable materials for the built environment: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 258, p. 120948, 2020. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Circular-economy-potential-of-sustainable-for-the-Sinoh-Othman/9e1fa7129a6d1fe080e4b54b976d42445a175149>. Acesso em: 22 jan. 2025.

TAVARES, Sérgio Fernando. Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras. 2006. 225 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2006. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/89528>. Acesso em: 20 jan. 2025.

TAVARES, Vanessa; GREGORY, Jeremy R.; KIRCHAIN, Randolph; FREIRE, Fausto. What is the potential for prefabricated buildings to decrease costs and contribute to meeting EU environmental targets? **Building and Environment**, v. 206, art. 108382, dez. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108382>. Acesso em: 21 jan. 2025.

THINKSTEP. GaBi: versão 10. Stuttgart: Thinkstep, [2025].

TORTUGA. Tortuga: versão 2.0. [S.l.]: Tortuga, [2025].

TURKAN, Yelda; RADKOWSKI, Rafael; KARABULUT-ILGU, Aliye; BEHZADAN, Amir H.; CHEN, An. Mobile augmented reality for teaching structural analysis. **Advanced Engineering Informatics**, v. 34, p. 90-100, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2017.09.005>. Acesso em: 22 jan. 2025.

USGBC – U.S. GREEN BUILDING COUNCIL. LEED: Leadership in Energy and Environmental Design. [S.l.]: USGBC, [s.d.]. Disponível em: <https://www.usgbc.org/leed>. Acesso em: 20 jan. 2025.

WIBERG, A. H.; LØVHAUG, S.; MATHISEN, M.; TSCHOERNER, B.; RESCH, E.; ERDT, M.; PRASOLOVA-FØRLAND, E. Visualisation of KPIs in zero emission

neighbourhoods for improved stakeholder participation using Virtual Reality. In: SUSTAINABLE BUILT ENVIRONMENT D-A-CH CONFERENCE 2019 (SBE19 Graz), 2019, Graz. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. Bristol: IOP Publishing, 2019. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/323/1/012074>. Acesso em: 20 jan. 2025.

WONG, Johnny Kwok Wai; ZHOU, Jason. Enhancing environmental sustainability over building life cycles through green BIM: A review. **Automation in Construction**, v. 57, p. 156–165, set. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.06.003>. Acesso em: 22 jan. 2025.

XUE, Zhuyuan; LIU, Hongbo; ZHANG, Qinxiao; WANG, Jingxin; FAN, Jilin; ZHOU, Xia. The Impact Assessment of Campus Buildings Based on a Life Cycle Assessment–Life Cycle Cost Integrated Model. **Sustainability** 2020, v. 12, n. 1, dez. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su12010294>. Acesso em: 22 jan. 2025.

ZHU, Shiyao; FENG, Haibo. Is energy-efficient building sustainable? A case study on individual housing in Canada under BCESC energy updates. **Building and Environment**, v. 239, art. 110452, jul. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110452>. Acesso em: 21 jan. 2025.

ZUBAIR, Muhammad Umer; MUBASHIR, Ali; KHAN, Muhammad Arsalan; KHAN, Adil; HASSAN, Muhammad Usman; TANOLI, Wagas Arshad. BIM- and GIS-Based Life-Cycle-Assessment Framework for Enhancing Eco Efficiency and Sustainability in the Construction Sector. **Buildings**, v. 14, n. 3, fev. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings14020360>. Acesso em: 6 fev. 2025.

METODOLOGIA

A revisão da literatura acerca da ACV no contexto do desenvolvimento sustentável e da crescente digitalização da arquitetura possibilitou identificar as ferramentas atuais de ACV e as lacunas intrínsecas ao tema. Em resposta, propõe-se uma ferramenta simplificada para estimativa de emissões de CO₂ de casas típicas brasileiras. Em síntese, as etapas metodológicas foram três: (1) delimitação dos cenários de estudo, (2) aplicação da ACV como método para estimativa de emissões de CO₂, nos cenários definidos, (3) elaboração e validação de uma ferramenta simplificada para o cálculo dessas emissões.

Inicialmente, a seção 3.1 apresenta a delimitação dos cenários de estudo, que se inicia pela identificação das características de uma casa típica brasileira no escopo do trabalho. Para isso, foram avaliadas três plantas de casas entre 39 e 58,64 m², construídas em estrutura independente de concreto armado com alvenaria de vedação em blocos cerâmicos (NBR 12721:2021; ABCP, 2010) ou em alvenaria estrutural com blocos de concreto (CAIXA Econômica Federal, 2007; ABCP, 2010). Em seguida, foram definidos cenários baseados em madeira como principal elemento construtivo – incluindo o uso de sistemas em *wood frame*, CLT, mata-junta e macho e fêmea. O impacto dessas quatro técnicas, que potencialmente podem reduzir emissões de CO₂ no setor de construção brasileiro (Orlandini e Punhagui, 2024), foi avaliado por meio de sete plantas baixas³, entre 43 e 60 m². Nesta etapa foram também estabelecidas as limitações do trabalho, e, por fim, levantados dados nacionais a respeito do consumo de materiais nos diferentes cenários.

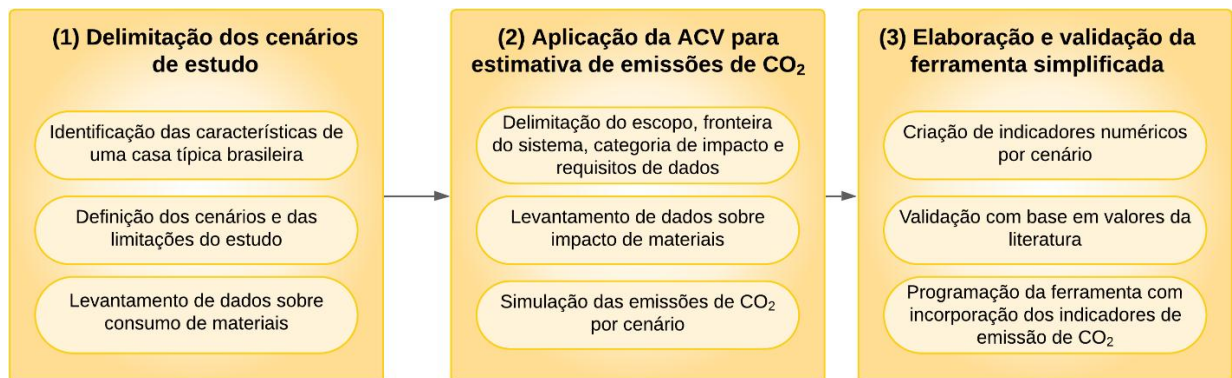
A seção 3.2 trata da abordagem proposta para a estimativa de emissões de CO₂ nos cenários delimitados em 3.1 por meio da ACV. Foram executadas as

³ Devido à dificuldade de encontrar “projetos-padrão” para os sistemas em madeira, essas plantas foram selecionadas com base no trabalho de Orlandini (2021), que trabalhou com 30 plantas baixas de casas nos mesmos quatro sistemas. Os critérios para a seleção de 7 entre as 30 são explicitados na seção 3.1.2.

etapas de definição de parâmetros para a ACV, conforme os procedimentos normativos, nomeadamente: a delimitação do escopo, da fronteira do sistema, da categoria de impacto e os requisitos de dados adotados. Além disso, foi realizado o levantamento de dados nacionais relativos ao impacto dos materiais considerados nos diferentes cenários cujas emissões de CO₂ foram simuladas, utilizando como base de dados o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (Sidac).

Por fim, a seção 3.3 descreve os procedimentos adotados para a elaboração da ferramenta simplificada proposta nesta dissertação. A seção destaca a abordagem metodológica, as tecnologias e os critérios que foram adotados para responder à funcionalidade desejada para a ferramenta. Um diagrama de resumo das etapas metodológicas descritas acima pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 — Diagrama das etapas metodológicas.



Fonte: Autoria própria.

3.1 Delimitação dos cenários de estudo

3.1.1 Identificação das características de uma casa unifamiliar térrea no Brasil

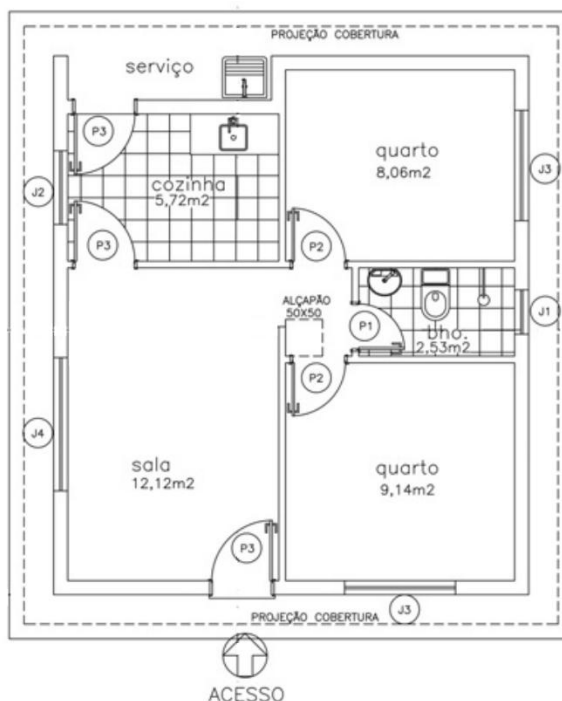
Considerando o objeto de estudo - as residências unifamiliares brasileiras - a primeira etapa metodológica consistiu na identificação de modelos de habitação

de referência a nível nacional. Como ponto de partida para a escolha desses modelos, foram considerados projetos padrão de habitação social no Brasil, nomeadamente: o projeto-padrão R1-B (NBR 12721:2021), a casa padrão da Caixa Econômica Federal (2007) e a planta exemplo no caderno Mãos à obra da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2010).

De acordo com o Custo Unitário Básico (CUB/m²), indicador de custos do setor da construção civil, e com a ABNT NBR 12721, o projeto-padrão de uma residência unifamiliar de padrão baixo (denominada R1-B), conta com 2 dormitórios e 58,64 m² de área real. O projeto da residência de padrão baixo diferencia-se das de padrão normal e alto pela área da edificação, pelo padrão de acabamento da casa, e pelo número de dormitórios, banheiros, e a presença ou não de espaços como varanda e sala de jantar - que não existem na residência de padrão baixo.

O projeto do R1-B é composto por dois dormitórios, sala, banheiro, cozinha e área de serviço, conforme ilustra a planta baixa na Figura 5. Os dados necessários para compreensão dos projetos foram obtidos por meio da NBR 12721 e pela cartilha explicativa do CUB/m² feita pelo SINDUSCON-MG (2007), que providencia informações mais detalhadas sobre os projetos que compõem a norma.

Figura 5 — Planta baixa do projeto-padrão R1B.

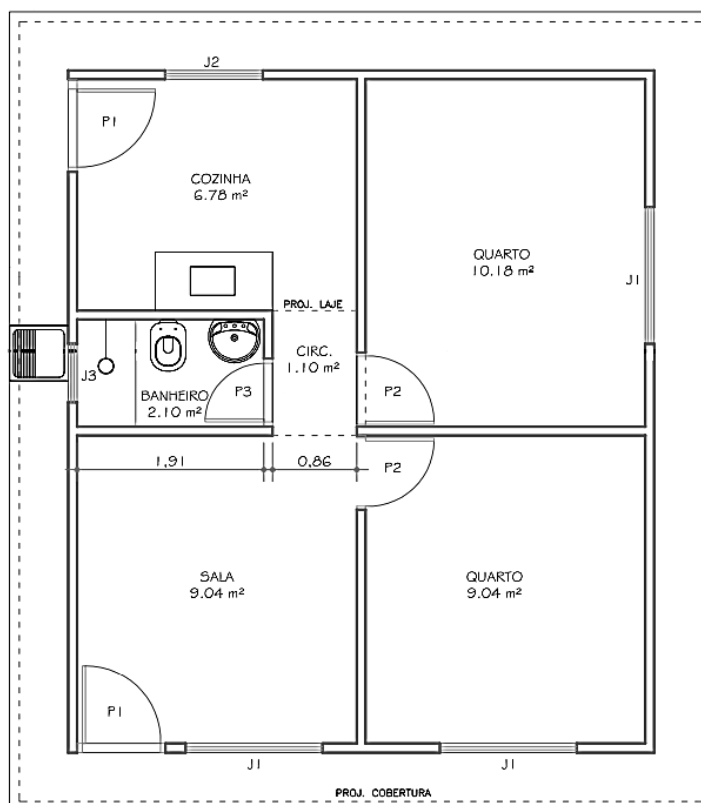


Fonte: SINDUSCON-MG (2007).

O segundo projeto-padrão considerado foi a casa padrão originalmente utilizada pela Caixa Econômica Federal no financiamento do Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV). O programa foi criado para incentivar a produção e compra de novas unidades habitacionais por famílias com renda de até dez salários-mínimos, em todo o Brasil (BRASIL, 2009; Rolnik *et al.*, 2010). Atualmente, o PMCMV é direcionado para famílias que tenham renda bruta mensal de até R\$8.000, no caso de famílias que residem em áreas urbanas, e anual de até R\$96.000, para famílias que residem em áreas rurais (BRASIL, 2023).

Neste estudo, a casa padrão considerada foi aquela apresentada nos Cadernos CAIXA (2007), conforme pode ser visto na Figura 6. A residência de 41,87 m² também conta com dois dormitórios, uma sala, uma cozinha, um banheiro e uma área de serviço - como no projeto-padrão R1-B.

Figura 6 — Planta baixa do projeto-padrão do PMCMV.

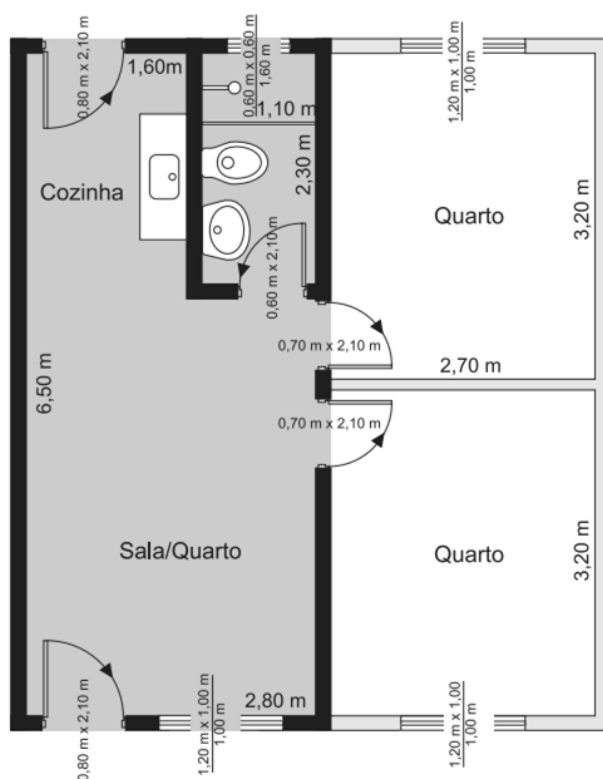


Fonte: CAIXA Econômica Federal (2007).

Por fim, o estudo também considera um terceiro projeto de referência para casas térreas brasileiras: o exemplo do caderno Mãos à Obra. Entendendo que mais da metade do volume de materiais de construção é adquirida por famílias, a ABCP desenvolveu o Mãos à Obra com o objetivo de fornecer um passo a passo simplificado das etapas de construção de uma residência, abordando questões de segurança, durabilidade, patologias, entre outras (ABCP, 2010).

Da mesma forma que nos projetos citados anteriormente, o projeto exemplo do Mãos à Obra (MAB) finalizado possui dois dormitórios, uma sala, uma cozinha e um banheiro. Não é prevista uma área de serviço. A Figura 7 apresenta a planta baixa do exemplo de planta dada pela ABCP, que subdivide a casa em duas etapas de construção: a parte embrionária, de 20 m², que constitui uma sala/quarto, a cozinha e o banheiro, e uma ampliação de dois quartos que adicionam 19 m² à construção. Assim, o projeto completo tem uma área de 39 m², que foi a área considerada para fins comparativos com os outros projetos.

Figura 7 — Planta baixa do projeto-padrão Mãos à Obra.



Fonte: ABCP (2010).

Vale ressaltar que dentre os projetos estão inclusos dois tipos de sistemas construtivos: enquanto o R1-B é constituído por uma estrutura convencional em concreto armado com fechamento em alvenaria cerâmica, e o PMCMV é construído em alvenaria estrutural com blocos de concreto, para o MAB foram considerados os dois sistemas.

Por fim, a Tabela 4 resume os três modelos de projeto-padrão que foram adotados como representativos de uma casa típica brasileira, apresentando o nome pelo qual se referenciará o projeto a partir deste ponto, a área construída de cada projeto, a descrição dos ambientes e o sistema construtivo adotado para a posterior avaliação das emissões de CO₂.

Tabela 4 — Projetos representativos de uma casa típica brasileira.

Nome do projeto	Área construída	Descrição dos ambientes	Sistema Construtivo	Fonte da planta baixa
R1-B	58,64 m ²	2 dormitórios, sala, cozinha, banheiro e área de serviço	Concreto armado com alvenaria cerâmica (S1)	SINDUSCON-MG (2007)
PMCMV	41,87 m ²	2 dormitórios, sala, cozinha, banheiro e área de serviço	Alvenaria estrutural com blocos de concreto (S2)	CAIXA Econômica Federal (2007)
MAB (Mãos à Obra)	39 m ²	2 dormitórios, sala, cozinha e banheiro	S1 e S2	ABCP (2010)

Fonte: Autoria própria, com base em SINDUSCON-MG (2007), CAIXA Econômica Federal (2007) e ABCP (2010).

3.1.2 Definição de cenários baseados em madeira e das limitações do estudo

O objetivo desta etapa é definir sistemas construtivos alternativos aos modelos residenciais de casas térreas brasileiras construídas em sistemas baseados em alvenaria. Mais especificamente, buscou-se definir sistemas construtivos de menor impacto ambiental presumido, que serão avaliados por meio da ACV, cujos resultados serão incorporados na ferramenta simplificada proposta para fins comparativos.

Primeiramente, foi feita a escolha de adotar como soluções alternativas os sistemas construtivos baseados em madeira, considerando os objetivos do trabalho associados ao comprovado potencial de redução nas emissões de CO₂

pelo uso prolongado da madeira (Amiri *et al.*, 2020; Hertwich *et al.*, 2019; Orlandini e Punhagui, 2024). Entretanto, a literatura destaca que as vantagens do uso da madeira para mitigação do impacto proveniente dessas emissões dependem de alguns fatores: (i) a sua origem, que deve ser sustentável – ou seja, não utilizar madeira nativa; (ii) o uso de recursos e (iii) o propósito do produto em relação ao seu ciclo de vida (Bergman *et al.*, 2014; Börjesson e Gustavsson, 2000; Fearnside, 1999).

Nesse contexto, é importante ressaltar que o Brasil, apesar de extrair e produzir um volume anual de aproximadamente 266 milhões de m³ de madeira (SFB, 2024), utiliza 80% do material para produtos com baixo valor agregado, como fôrmas e chapas (Araujo, 2018; SEBRAE, 2014; SINDUSCON, 2011). Esses produtos, que são tipicamente usados como apoio para sistemas construtivos em concreto armado com vedação em alvenaria, tem um ciclo de vida curto e não representam todo o potencial de mitigação de emissões proporcionado pela madeira (Orlandini e Punhagui, 2024).

Portanto, com o fim de comparar o potencial impacto ambiental de casas brasileiras em cenários alternativos ao convencional, foram adicionados à análise os quatro sistemas construtivos em madeira analisados por Orlandini e Punhagui (2024): (i) mata junta, (ii) pré-fabricado macho e fêmea, (iii) *wood frame* e (iv) CLT. Os dois primeiros são as técnicas construtivas mais adotadas no cenário brasileiro de construção, apesar de não se enquadrarem nos requisitos estabelecidos pelas NBR 15575 por conta da espessura das paredes (Philippi, 2014; Zani, 2013; Batista, 2007), usualmente muito esbeltas. Para incluir sistemas que atendem às normas brasileiras, os sistemas em *wood frame* e CLT também foram considerados.

Para cada sistema, foram adotadas as definições dadas por Orlandini (2021), que são resumidas na Tabela 5.

Tabela 5 — Definições adotadas para os sistemas construtivos em madeira.

Sistema	Descrição	Referências
Mata junta	Composto por tábuas verticais pregadas, cuja vedação é feita com mata junta. Tem paredes de 1,5 cm de espessura, mata juntas de 4 x 1,2 cm a cada 30 cm, caibros de 5 x 6 cm, pilares de 10 x 10 cm e vigas de 6 x 12 cm.	Orlandini (2021), Punhagui (2014), Batista (2007), Zani (2013)
Pré-fabricado macho e fêmea	Paredes duplas de 5 cm de espessura final, compostas por tábuas horizontais de madeira maciça com encaixes de juntas tipo macho-fêmea. Caibros de 5 x 6 cm, pilares de 10,5 x 10,5 cm e vigas de 8 x 15 cm.	Orlandini (2021), Punhagui (2014), <i>site</i> Casas Paraná, Philippi (2014)
<i>Wood frame</i>	Estrutura leve composta de peças de madeira serrada maciça, com fechamento em chapas de OSB (2 chapas de 1,9 cm de espessura final). Caibros de 5 x 6 cm, pilares de 4 x 9 cm e vigas de 8 x 15 cm a cada 50 cm. Uso de lã de vidro em paredes externas e internas, drywall em todas as paredes (com 2 chapas em paredes internas) e filme de polietileno em paredes externas.	Orlandini (2021), Tec Verde (2020), Silva (2018) – com modificações para adicionar outros materiais além da madeira.
CLT (Cross Laminated Timber)	Estrutura composta por painéis de madeira laminada cruzada sobrepostas em camadas de madeira maciça coladas em sentidos opostos e alternados. Adotadas placas de 12 cm de espessura final, com 5 camadas. Inclui também o adesivo a base de poliuretano (PUR) utilizado na fabricação das placas, o uso de drywall de 12,5 mm para revestimento interno em todas as paredes, lã de vidro de 90 mm em paredes externas (contrafachada) e filme de polietileno em paredes externas.	Orlandini (2021) – com modificações para adicionar outros materiais além da madeira.

Fonte: Adaptado de Orlandini (2021), com modificações.

Para os sistemas baseados em madeira, foram consideradas as emissões de CO₂ relativas à madeira, com base nos dados do estudo de Orlandini e

Punhagui (2024), e foram inclusas na análise: (i) as emissões relacionadas à outros materiais de vedação usuais nos sistemas de CLT e *wood frame*, como lã de vidro, filme de polietileno e drywall para revestimento interno; (ii) as emissões incorporadas aos adesivos de poliuretano (PUR), utilizado na colagem das camadas de madeira no sistema CLT; (iii) as emissões relacionadas ao uso de alvenaria nas áreas molhadas da casa, apenas nos sistemas de mata-junta e macho e fêmea. Considerou-se que nos sistemas em CLT e *wood frame* o uso de alvenaria nas áreas molhadas não é necessário, já que nesses sistemas a umidade pode ser controlada pela impermeabilização e revestimentos adequados.

Para estimar o impacto relativo à emissão de CO₂ dessas alvenarias, foram selecionadas plantas baixas de casas em madeira, e a partir do estudo da planta foram determinadas a área total construída em madeira e a área necessária de alvenaria, referente à construção do banheiro e cozinha. A partir disso, foi determinado o consumo de blocos de concreto de vedação, argamassas, concreto e aço (conforme item 3.1.4). O consumo dos materiais isolantes adicionados aos sistemas de CLT e *wood frame* também foi determinado com base nas plantas.

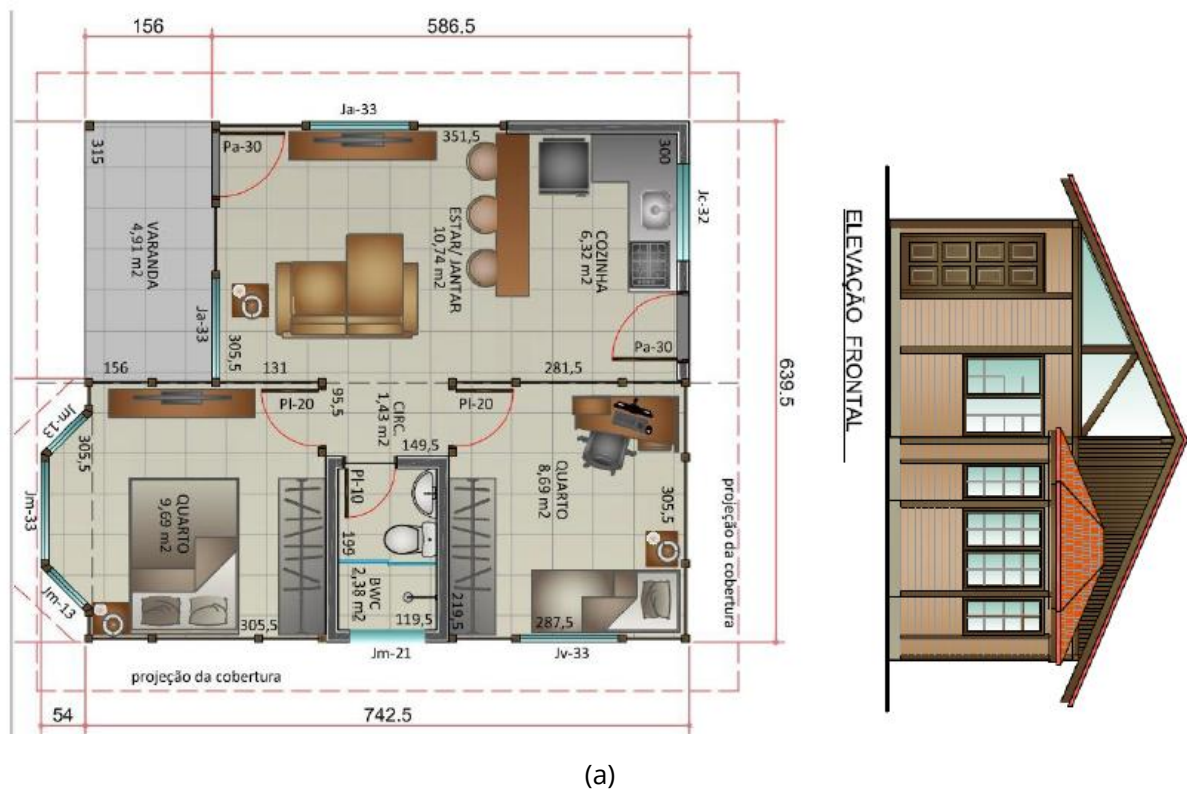
As sete plantas utilizadas para esse processo foram selecionadas a partir da seleção feita no estudo de Orlandini (2021), que estudou os mesmos quatro sistemas em madeira. Na falta de projetos-padrão de sistemas baseados em madeira no Brasil, a seleção feita pela autora mostrou-se confiável pelo número de plantas pré-selecionadas (30), que foi suficiente para modelar cenários estratégicos de emissão de CO₂. Das 30, foram excluídas 22 plantas que não atendiam aos seguintes critérios:

- A área total da casa, deve ser comparável aos cenários de casas convencionais, com uma tolerância de 5%. Foram excluídas, portanto, casas com menos de 37,05 m² e mais de 61,57 m²;

- As casas selecionadas devem ter dois dormitórios, também para manter a comparabilidade com os projetos convencionais;
- As plantas devem ter cotas legíveis, principalmente no que diz respeito às áreas de alvenaria que serão contabilizadas;
- No caso de duas plantas serem idênticas, com exceção da existência ou não de varanda, foi excluída a planta com varanda.

Ao fim, os projetos selecionados variam entre 40,95 m² e 60,22 m² de área total construída. Em média, a área de paredes externas e internas construída em madeira representa aproximadamente 78% de área construída (41,27 m²), enquanto a área molhada construída em alvenaria representa os outros 22% (8,91 m²). Abaixo, a Figura 8 apresenta os oito modelos selecionados para o estudo dos casos de construção em madeira, nomeados como casos A a G.

Figura 8 — Plantas baixas dos cenários alternativos A a G.

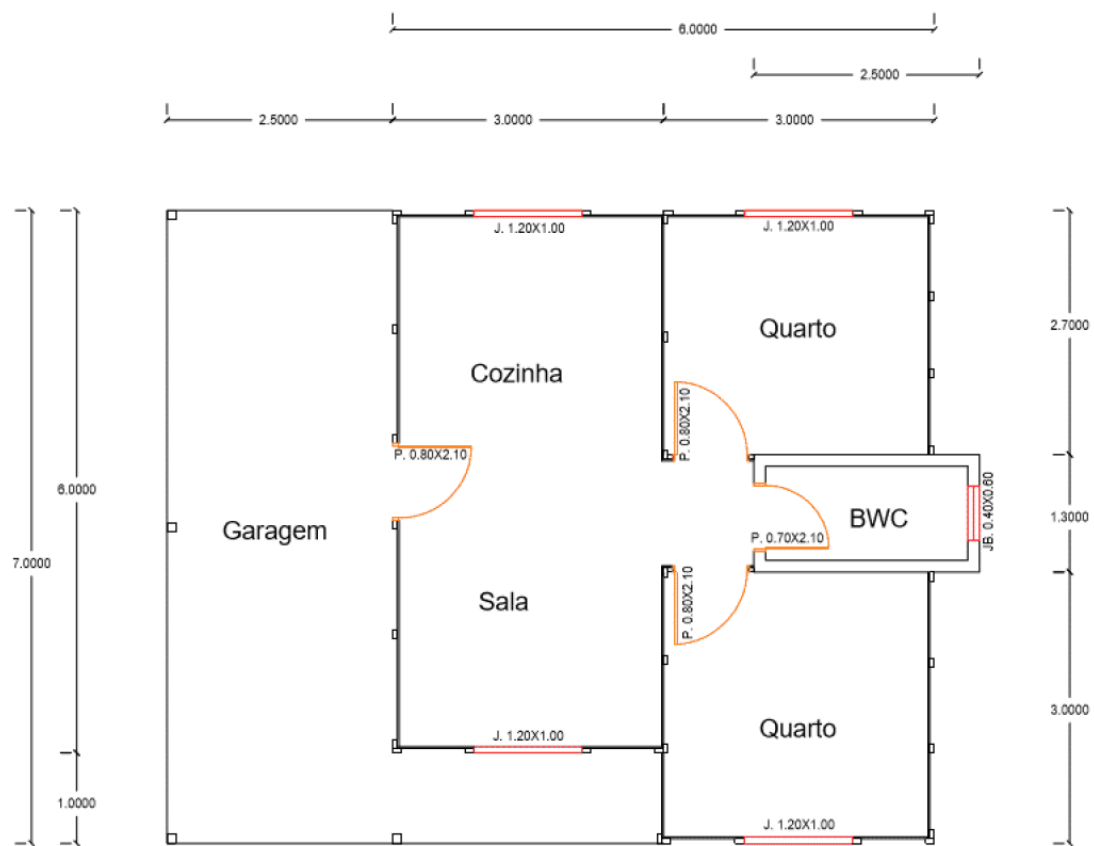


[illegible]

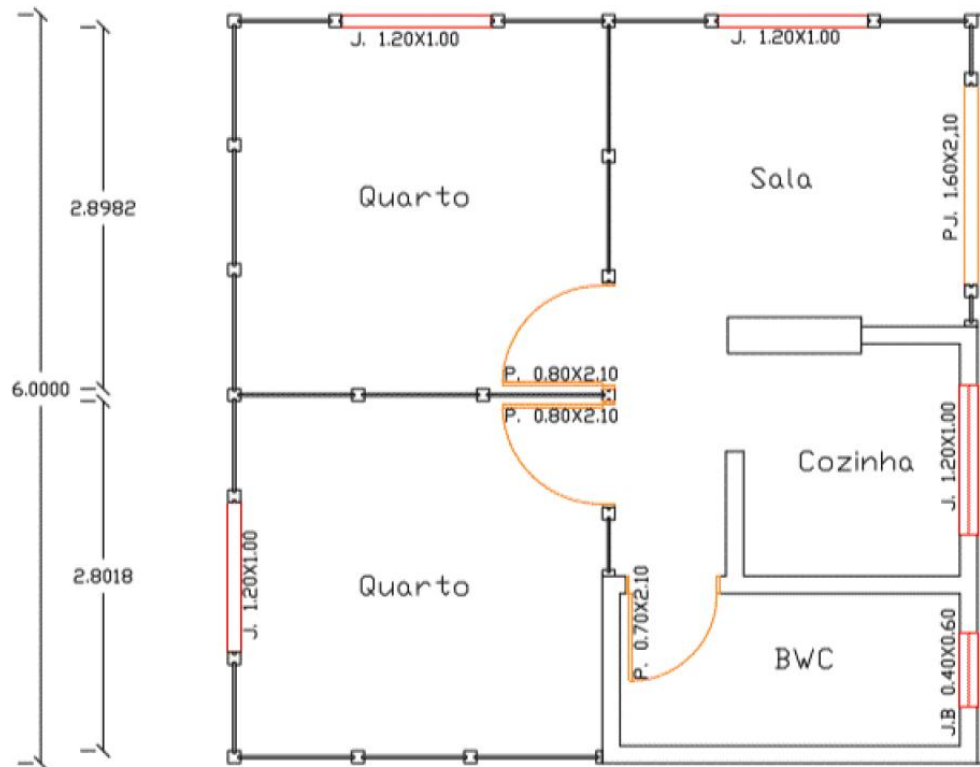
(c)



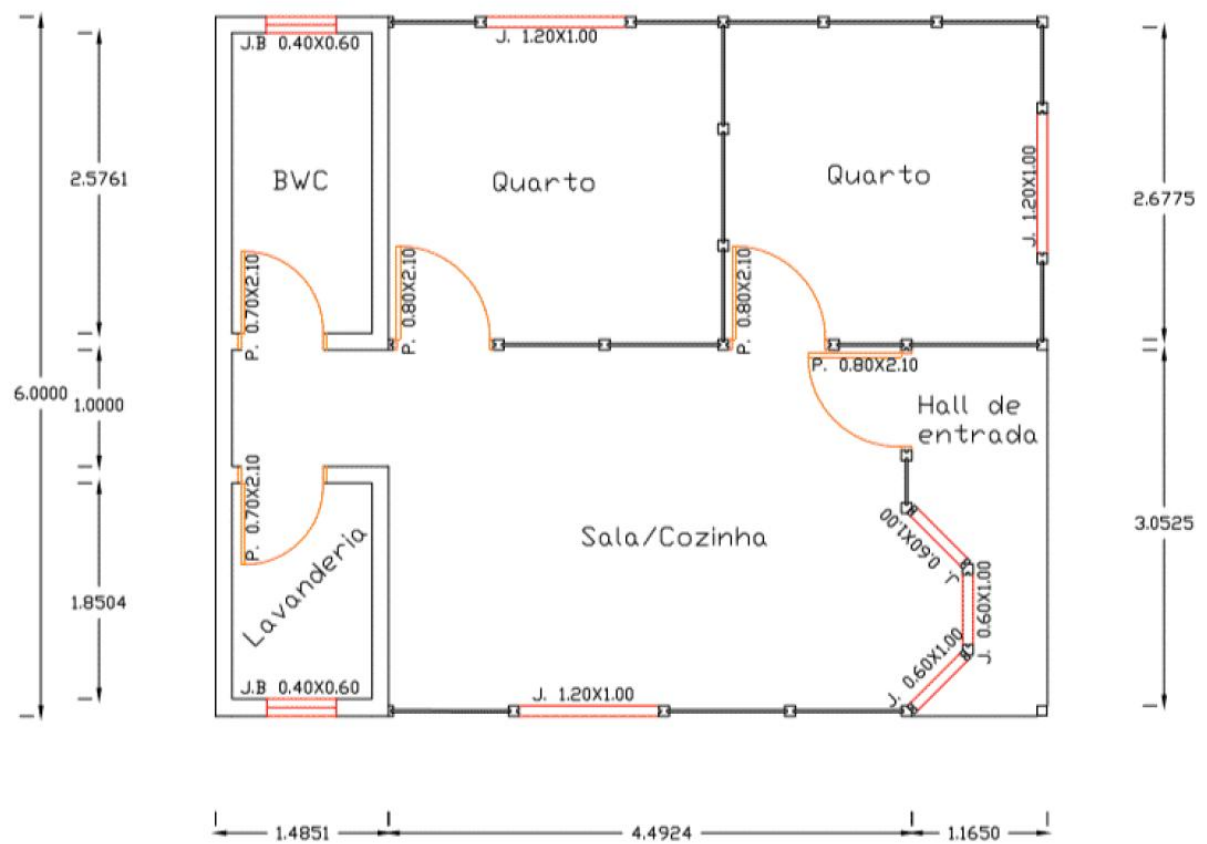
(d)



(e)



(f)



(g)

Fonte: Orlandini (2021).

A Tabela 6 resume as áreas totais de madeira e de alvenaria consideradas para cada modelo de casa, de A a H. Vale ressaltar que as áreas de varanda e de garagem não foram contabilizadas.

Tabela 6 — Quadro resumo de áreas para os modelos residenciais em madeira.

Áreas (m²)	A	B	C	D	E	F	G	Média
Total	47,95	56,38	57,27	56,29	42,90	41,16	49,34	50,18
Madeira	39,25	47,57	39,22	46,6	39,65	33,8	42,8	41,27
Alvenaria	8,7	8,81	18,05	9,69	3,25	7,15	6,54	8,91

Fonte: Autoria própria.

3.1.3 Limitações do estudo

O presente estudo:

- Limita-se quanto à tipologia de edificação estudada, ao passo em que abrange apenas edificações residenciais unifamiliares, no escopo do que é convencional para a realidade brasileira;
- Considera modelos residenciais dentro de uma determinada faixa de área construída, o que pode fazer com que os resultados apresentados não sejam representativos de residências maiores em área;
- Estima as emissões de CO₂ relacionadas à produção dos materiais utilizados para as paredes e estrutura das casas, com o revestimento básico para habitabilidade. Não considera as emissões relacionadas à pisos, fundações, instalações, esquadrias, coberturas e telhados;
- Reflete uma estimativa de emissões de CO₂ baseada majoritariamente por dados brasileiros obtidos pelo Sidac (com exceção de materiais isolantes e de revestimento considerados para os sistemas CLT e *wood frame*), não sendo representativo, portanto, de realidades de outros países;

- Não faz distinção quanto à região do país na qual a casa será construída, nem considera questões de conforto ambiental específicas de determinadas zonas bioclimáticas. Desconsidera as emissões relacionadas ao transporte dos materiais até o local de construção da residência, as perdas de material na obra, bem como as emissões relacionadas ao uso e fim de vida das edificações;
- Busca fazer uma estimativa, entendendo que é de consenso na literatura científica sobre o assunto que são muitas as variáveis que podem afetar os índices de emissões de CO₂ de materiais e edificações.

3.1.4 Levantamento de dados sobre consumo dos materiais

Os insumos considerados para a produção dos modelos residenciais considerados representativos da construção típica Brasil (R1-B, PMCMV e MAB) podem ser divididos em cinco categorias: (i) concretos, (ii) argamassas, (iii) blocos, (iv) aço e (v) madeira. A lista completa de insumos varia de acordo com o projeto de cada modelo, conforme apresenta a Tabela 7.

Tabela 7 — Lista de insumos considerados para casas R1-B, PMCMV e MAB, nos sistemas S1 e S2.

Modelo	Categoria	Insumo
R1-B Em sistema S1	Concreto	Concreto dosado em obra, traço 1:2:3
	Argamassas	Argamassas de assentamento em 1:2:9 e de revestimento em 1:2:9 e 1:3
	Blocos	Blocos cerâmicos
	Aço	Estribos e vergalhões de 5 ou 6,3 mm
	Madeira	Fôrmas de madeira <i>pinus</i> aplainada e seca em estufa

(Continua na próxima página)

Modelo	Categoria	Insumo
MAB Em sistema S1	Concreto	Concreto dosado em obra, traço 1:2:3
	Argamassas	Argamassas de assentamento em 1:2:9 e de revestimento em 1:2:9 e 1:3
	Blocos	Blocos cerâmicos
	Aço	Estribos e vergalhões de 5 ou 6,3 mm
	Madeira	Fôrmas de madeira <i>pinus</i> aplainada e seca em estufa
PMCMV Em sistema S2	Concreto	Concreto de 20 MPa, dosado em central, usado para enchimento das calhas
	Argamassas	Argamassas de assentamento em 1:2:9 e de revestimento em 1:2:9 e 1:3
	Blocos	Blocos de concreto em ½ vez para alvenaria, de 9x19x39 cm
		Blocos de concreto tipo calha/canaleta para vergas e contra-vergas, de 9x19x39 cm
		Blocos de concreto tipo calha/canaleta, 9x19x19 cm, para viga de travamento
	Aço	Armação com 2 barras corridas de diâmetro 5 mm
MAB Em sistema S2	Concreto	Concreto dosado em obra, traço 1:2:3
	Argamassas	Argamassa 1:1/2:6 para assentamento da alvenaria
		Argamassa 1:4 para revestimento de áreas molhadas
	Blocos	Blocos de concreto 10x20x40 cm
		Blocos de concreto tipo calha/canaleta, 10x20x40 cm
	Aço	Armação com 2 barras corridas diâmetro 5 mm

Fonte: Autoria própria, com base em Orlandini e Punhagui (2024), CAIXA (2007), ABCP (2010) e Costa (2012).

Destacam-se algumas diferenças entre a lista de insumos para cada modelo residencial. Primeiramente, a diferença de sistemas construtivos entre o R1-B e o PMCMV faz com que a lista de insumos do R1-B inclua blocos cerâmicos e fôrmas de madeira, que não fazem parte da lista de materiais do PMCMV ou do MAB em S2. Ainda, foi adotado o concreto dosado em obra para os casos R1-B e MAB nos dois sistemas, visto que as fontes dos dados de consumo forneceram o consumo de cimento, areia, brita e cal separadamente. Os valores do consumo de concretos e argamassas para esses casos foram calculados com base nas plantas-baixas já apresentadas, garantindo por meio da categorização nesses dois grupos (concretos e argamassas) que todos os modelos fossem facilmente comparáveis.

Nesse sentido, ressalta-se que os projetos são equivalentes em relação aos sistemas considerados: para todos os modelos, considerou-se a envoltória e as paredes internas de cada casa, incluindo estrutura e vedação. Não foram considerados os materiais referentes à fundação, piso, esquadrias, vidros, cobertura, instalações (hidráulicas, elétricas ou sanitárias). Para o PMCMV e para o MAB em S2, foram considerados revestimentos argamassados de 2 cm de espessura nas paredes do *box*, até 1,5 m de altura, e uma faixa de 0,5 m nas áreas molhadas acima da pia, do tanque e do lavatório. Para o caso R1-B, não foi considerado esse tipo de revestimento, e para nenhum caso foram consideradas pinturas ou outros tipos de revestimento. Nos dois casos de sistema S1, foi considerado o uso de blocos cerâmicos com dimensões entre 9x19x19 cm e 11.5x14x24 cm.

A seguir, é apresentado o processo metodológico de levantamento de dados acerca do consumo de cada material considerado, por modelo de residência.

3.1.4.1 Modelo R1-B

Apesar da NBR 12721, que estabelece o lote básico por área construída para o modelo residencial R1-B, incluir dados sobre o consumo de cada material, optou-se pela quantificação do consumo de materiais por análise da planta. Para isso, os dados apresentados na Tabela 8 foram associados às seguintes suposições:

- O uso de blocos cerâmicos entre 09 x 19 x 19 cm e 11.5 x 14 x 24 cm;
- Pilares com dimensões entre 15 x 20 cm e 15 x 30 cm;
- Vigas com dimensões de 15 x 30 cm;
- Um consumo de argamassas baseado nos traços mais praticados, de 1:2:9 para argamassas de assentamento de 1 cm de espessura e para argamassa de revestimento de 1,5 cm de espessura, e de traço 1:3 para chapiscos de 0,5 cm de espessura (Sonvezzo e John, 2022);
- Um fator de conversão de 2376 kg/m³ para o concreto dosado em obra de traço 1:2:3 (Sidac, 2022).

A Tabela 8 apresenta o consumo adotado para cada material considerado no escopo deste estudo, em kg/m², considerando a construção *in loco* de uma residência unifamiliar em concreto armado com paredes em alvenaria cerâmica sem função estrutural.

Tabela 8 — Consumo de diferentes materiais para residências unifamiliares típicas brasileiras.

Insumo	Consumo mínimo	Consumo máximo
Concreto	2,07 m ³	2,4 m ³
Aço	0,0178 m ³	0,037 m ³
Fôrmas de madeira	1,02 m ³	1,52 m ³
Argamassas	3,25 m ³	3,69 m ³
Blocos cerâmicos	7212,72 kg	10672,48 kg

Fonte: Autoria própria.

3.1.4.2 Modelo PMCMV

Para o cenário de residência PMCMV, que difere do R1-B por ser construída em alvenaria estrutural com blocos de concreto, os dados sobre consumo dos materiais foram obtidos com base no estudo de Costa (2012), que fez um estudo de caso sobre emissões de CO₂ da mesma casa padrão da CAIXA, antes do lançamento do Sidac como ferramenta para consulta de índices de emissões de CO₂.

Assim, a Tabela 9 apresenta os valores adotados para o consumo de materiais por metro quadrado de área construída, bem como os indicadores de perda adotados para cada insumo. Nota-se que o consumo de concreto é apresentado em m³/m² de área construída, enquanto os outros materiais são apresentados em kg de material/m² de área construída. A adoção dessa unidade no consumo de concreto foi feita para facilitar o cálculo das emissões de CO₂, já que o fator de emissão equivalente para o material no Sidac tem como unidade kgCO₂/m³.

Tabela 9 — Consumo de diferentes materiais para residências unifamiliares típicas brasileiras no modelo PMCMV.

Insumo	Consumo total da casa	Consumo (kg/m ²)
Concreto	0,44 m ³	24,75
Argamassa de assentamento	1330 kg	31,76
Argamassa de revestimento	200 kg	4,77
Aço	16 kg	0,38
Bloco de concreto	13490 kg	322,18

Fonte: Autoria própria, com base em dados de Costa (2012).

3.1.4.3 Modelos MAB

Para o cenário MAB em alvenaria estrutural com blocos de concreto (S2), todos os dados relativos ao consumo de materiais foram obtidos com base no

folheto Mãos à Obra, desenvolvido e disponibilizado online pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2010).

A Tabela 10 apresenta os valores adotados para o consumo de cada insumo, na totalidade da edificação e em kg/m². Ressalta-se que o consumo de concreto de traço 1:2:3 foi calculado com base nos quantitativos de cimento, areia e brita da fonte de dados de consumo (ABCP, 2010), adotando massa específica da areia de 1700 kg/m³ e da brita de 2600 kg/m³.

Tabela 10 — Consumo de diferentes materiais para residências unifamiliares brasileiras no modelo MAB em sistema S2.

Insumo	Consumo total na residência	Consumo (kg/m ²)
Concreto	0,4 m ³	24,37
Argamassa de assentamento	0,813 m ³	32,61
Argamassa de revestimento	0,239 m ³	5,97
Aço	24,8 kg	0,63
Bloco de concreto	14254,4 kg	450,52

Fonte: Autoria própria, com base em ABCP (2010).

A residência padrão MAB também foi avaliada no sistema S1 (concreto armado com vedação cerâmica). Nesse caso, o quantitativo de materiais foi calculado com base na planta baixa do modelo residencial, e nas mesmas suposições utilizadas para o modelo R1-B (ver item 3.1.4.1). Assim, a Tabela 11 apresenta os valores adotados para o consumo de material. Os fatores de conversão (kg/m³) vieram do Sidac, conforme especificação do material (ver Tabela 7).

Tabela 11 — Consumo de diferentes materiais para residências unifamiliares brasileiras no modelo MAB em sistema S1.

Insumo	Consumo mínimo	Consumo máximo
Concreto	1,86 m ³	2,24 m ³
Aço	195 kg	312 kg
Fôrmas de madeira	1248 kg	1365 kg
Argamassas	7293 kg	7410 kg
Blocos cerâmicos	5366,13 kg	6732,05 kg

Fonte: Autoria própria, com base em ABCP (2010).

3.1.4.4 Modelos em sistemas baseados em madeira

Para os modelos residenciais construídos em sistemas baseados em madeira (ver 3.1.2), os dados de consumo foram calculados com base nas plantas apresentadas pela Figura 8. Primeiro, foram calculadas as áreas de paredes externas e internas de cada modelo residencial, em metros quadrados de parede, considerando um pé direito de 2,8 m. Essas informações foram utilizadas para calcular o consumo de materiais nos sistemas *wood frame* e CLT. A Tabela 12 apresenta os dados de consumo utilizados para o sistema em *wood frame*, por metro quadrado de parede construída, enquanto a Tabela 13 apresenta as mesmas informações para o sistema em CLT. Em ambos os casos, adotou-se pé direito de 2,8 m, fator de conversão de 530 kg/m³ para as madeiras estruturais (Sidac, 2024) e 600 kg/m³ para as placas de OSB.

Tabela 12 — Consumo de diferentes materiais para residências unifamiliares brasileiras em *wood frame*, por metro quadrado de parede construída.

Insumo	Função	Consumo por m² de parede	Tipo de parede
Madeira <i>pinus</i> (serrada, aplainada e seca em estufa) para a estrutura	Estrutura de madeira com pilares de 4x9 cm, vigas de 8x15 cm e caibros de 5x6 cm	Entre 18,5 e 23,85 kg	Paredes internas e externas
OSB de 1,9 cm, 2 chapas (uma de cada lado)	Fechamento da estrutura	Entre 50,5 e 85,15 kg	Paredes externas
Lã de vidro (90 mm)	Isolamento térmico entre montantes	1,35 kg	Paredes externas e internas
Filme de polietileno	Barreira de vapor	0,01 kg	Paredes externas
Drywall (duplo em paredes internas)	Revestimento interno	10,5 kg em paredes externas e 21 kg em paredes externas	Paredes internas e externas

Fonte: Autoria própria.

Tabela 13 — Consumo de diferentes materiais para residências unifamiliares brasileiras em CLT, por metro quadrado de parede construída.

Insumo	Função	Consumo por m ² de parede	Tipo de parede
Madeira <i>pinus</i> (serrada, aplainada e seca em estufa) para a estrutura	Painel de 12 cm com função estrutural e de vedação	63,6 kg	Paredes internas e externas
Drywall de 12,5 mm	Revestimento interno	10 kg	Paredes internas e externas
Lã de vidro (90 mm)	Isolamento térmico	$= 0,09 \times 15 \times R_p$	Paredes externas
Filme de polietileno	Barreira de vapor	$= 0,0001 \times 950 \times R_p$	Paredes externas
Adesivo de poliuretano	Colagem da madeira	0,55 kg	Paredes internas e externas

Fonte: Autoria própria.

Nota: R_p significa a razão entre a área de paredes externas pela área de paredes internas, em metros quadrados, que variou por modelo residencial.

Em nenhum dos casos foi considerado o revestimento externo, pinturas ou outros aspectos que também não foram tratados nos modelos residenciais baseados em alvenaria (R1-B, PMCMV e MAB). Além disso, cabe ressaltar que, para o cálculo do quantitativo do OSB no sistema *wood frame*, considerou-se que a soma entre a massa de madeira estrutural e de chapas OSB seria entre 69 e 109 kg, baseado nos achados de Orlandini e Punhagui (2024). Abaixo, a Tabela 14 apresenta os valores de referência de Orlandini e Punhagui (2024), que também foram adotados para os sistemas em mata-junta e em macho e fêmea.

Tabela 14 — Consumo de madeira para residências unifamiliares brasileiras construídas em sistemas baseados em madeira.

Origem da madeira e sistema construtivo	Consumo mínimo (kg/m ²)	Consumo mediano (kg/m ²)	Consumo máximo (kg/m ²)
Plantada em mata-junta	27	40	59
Plantada em macho e fêmea	57	83	118
Plantada em <i>wood frame</i>	69	85	109

Fonte: Orlandini e Punhagui (2024).

Cabe ressaltar que Orlandini e Punhagui (2024), além das varandas e garagem, também não consideraram o uso de alvenaria em banheiros, lavanderias e cozinhas. Portanto, a segunda etapa de obtenção dos dados de consumo para esses cenários consistiu no levantamento dos insumos necessários para a construção de paredes de alvenaria em áreas molhadas (banheiros, lavanderias e cozinhas), com bases na análise das sete plantas baixas selecionadas (ver 3.1.2). Esses dados foram utilizados somente para os cenários de construção em mata-junta ou macho e fêmea, visto que nas construções em CLT ou *wood frame* é possível trabalhar com a madeira também nas áreas molhadas sem comprometer a durabilidade do projeto.

Assim, o primeiro passo foi determinar a área de alvenaria que será considerada para cada caso, que foi apresentado na Tabela 6. Cabe ressaltar que, para a estimativa de emissões de CO₂ por cenários, foram adotados os valores médios apresentados na última coluna da tabela. Em seguida, o consumo de cada insumo necessário para a construção da alvenaria foi estimado com base na planta baixa de cada caso (A a G), considerando uma altura de 2,8 m para todas as paredes. Foram considerados como insumos: blocos de concreto, argamassa, concreto e aço – de acordo com as seguintes suposições:

- Para 1 m² de parede, são necessários 13 blocos de concreto de 14x19x39 cm;
- 40% dos blocos canaleta de 14x19x39 cm serão preenchidos com concreto, em uma fiada referente à cinta de amarração e nas vergas;
- Para o aço, considerou-se o uso de duas barras corridas de 5 mm (consumo mínimo) ou 6,3 mm (consumo máximo);
- A argamassa contabilizada é referente apenas ao assentamento dos blocos.

Para todos os cenários, foram considerados níveis de consumo mínimo e máximo. Além da variação no aço conforme citado acima, o cenário de consumo mínimo de argamassas considera um traço 1:2:8, enquanto o de consumo máximo considera um traço de 1:1:6. O consumo mínimo e o consumo máximo referentes a construção de uma casa, com base na média dos valores encontrados a partir da aplicação desse método de cálculo de consumo nos oito modelos residenciais alternativos, pode ser visto na Tabela 15. Foram adotadas as mesmas unidades de referência que são encontradas para as emissões dos insumos equivalentes no Sidac.

Tabela 15 — Consumo de materiais para a alvenaria na construção de uma residência unifamiliar brasileira em sistema mata-junta ou macho e fêmea.

Insumo	Consumo mínimo	Consumo máximo
Aço	5,05 kg	8,84 kg
Bloco de concreto	471 unidades	490 unidades
Argamassas	0,4 m ³	0,4 m ³
Concreto	0,17 m ³	0,17 m ³

Fonte: Autoria própria.

Considerando que a média de área construída em alvenaria nos sete modelos de residência alternativa é de 8,91 m², conforme mostra a Tabela 6 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, os valores de consumo de materiais por m² adotados para os cenários de construção em madeira foram os apresentados na Tabela 15 divididos por 8,91.

3.2 Aplicação da ACV para estimativa de emissões de CO₂

A fim de simular as emissões de CO₂ para todos os cenários apresentados, incluindo os diferentes sistemas construtivos – em alvenaria estrutural, concreto armado com fechamento em alvenaria cerâmica e as diferentes alternativas em

madeira – foi realizada uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), em conformidade com os procedimentos estabelecidos pela NBR ISO 14040, que estão descritos nas subseções a seguir.

3.2.1 Definição do objetivo e escopo

De acordo com a NBR ISO 14040, a profundidade e a abrangência de uma ACV, bem como seu escopo, não são consenso na literatura, variando de acordo com o objeto, objetivo e uso pretendido do estudo. Neste caso, a ACV foi utilizada com o objetivo específico de quantificar as emissões de CO₂ dos modelos selecionados de residência unifamiliar: R1-B, PMCMV, MAB (ver 3.1.1) e os sete projetos baseados em madeira (ver 3.1.2). Estes resultados serão utilizados no desenvolvimento de uma ferramenta simplificada para estimativa das emissões de CO₂ de edificações dessa tipologia. Destaca-se que, conforme citado em norma, a modelagem da ACV é sujeita a falhas, e a precisão dos resultados é dependente da precisão dos próprios dados utilizados.

3.2.2 Fronteira do *sistema*

A fronteira do sistema determina as fases do ciclo de vida inclusos na ACV. Este estudo considera uma abordagem do berço ao portão (A1-A3), incluindo, portanto, as primeiras etapas do ciclo de vida das edificações, que compõem a fase de produção e precedem a construção de fato.

3.2.3 Categoria de impacto

A categoria de impacto considerada neste estudo é o potencial de aquecimento global. A escolha por esta categoria de impacto é dada pelo

reconhecimento da mesma como um dos indicadores mais relevantes da área da construção civil (Belizario-Silva *et al.*, 2023; Proietti *et al.*, 2013; Zabalza *et al.*, 2013), além de ser pauta ambiental prioritária reconhecida por diversas organizações (UNEP, 2023; WBCSD, 2021; WorldGBC, 2022).

De acordo com a ISO 14067, para indicar o potencial de aquecimento global de um determinado produto utiliza-se o termo “pegada de carbono”. Entretanto, neste estudo considera-se como aspecto (elemento capaz de gerar como consequência o aquecimento global) apenas a emissão de CO₂, deixando de fora do escopo os outros gases de efeito estufa como o metano (CH₄), óxido nitroso, entre outros.

Essa escolha considera que o CO₂ é o gás que mais contribui para as emissões de globais de gases de efeito estufa, e o principal gás em processos industriais como os de produção de insumos utilizados na construção civil (IPCC, 2023). Por isso, os resultados são apresentados como pegada de CO₂ (e não de carbono), em kg, escolha que possibilita chegar a uma estimativa mais confiável.

3.2.4 Requisitos de dados

O uso de dados primários para ACV torna os resultados mais confiáveis, visto que os dados não são associados a suposições feitas por terceiros. Entretanto, a produção de dados primários é um processo que demanda tempo e recursos financeiros. Neste trabalho, foram utilizados dados secundários, obtidos por meio da plataforma Sidac (por sua vez, obtidos em alguns casos com fornecedores da indústria e em outros por consulta à literatura) e da consulta à literatura nacional.

O Sidac é um banco de dados específico para a realidade brasileira, que disponibiliza dados mais completos e atualizados em relação a outras bases de

dados. Esses aspectos são importantes para garantir que os resultados da ACV tenham um contexto geográfico e temporal.

3.2.5 Levantamento dos dados sobre emissões de CO₂, limitações e suposições do estudo

Para os cenários avaliados, foi necessário levantar dados (i) referentes ao consumo de material e (ii) referentes à emissão de CO₂ de cada produto considerado para a construção das casas. Destaca-se que a abordagem escolhida busca estimar as emissões do berço ao portão (conforme explicado em 3.2.2), e que foram consideradas apenas as emissões relacionadas à envoltória vertical e paredes internas dos modelos de residências, conforme delimitado em 3.1.

O método de levantamento dos dados tipo (i), referentes ao consumo de material, foi apresentado em 3.1.4. Nesta seção, são apresentados os dados tipo (ii), referentes aos valores de referência utilizados para a emissão de CO₂ por material. Os indicadores utilizados são apresentados abaixo na Tabela 16. Para a maioria dos materiais, foram utilizados os dados brasileiros da plataforma Sidac (2024), com exceção dos indicadores para as chapas de OSB, lâ de vidro, filme de polietileno e drywall, todos retirados do Ecoinvent *via* SimaPro (versão 9.1.1.1). Esta etapa também incluiu a consulta às páginas dos produtos pesquisados e aos relatórios técnicos complementares do Sidac, disponibilizados online.

Cabe ressaltar que, para as madeiras, foram consideradas as emissões de CO₂ fóssil e de desmatamento, que são aquelas relacionadas à queima de insumos energéticos fósseis e à decomposição ou queima de biomassa não renovável (Oliveira *et al.*, 2022). Não foram contabilizadas as emissões classificadas como biogênicas - ou seja, relacionadas à decomposição ou queima de biomassa renovável - visto que para isso seria necessário assumir um

determinado fim de vida útil para a madeira utilizada nesses modelos residenciais, o que está fora do escopo da presente ACV.

Tabela 16 — Emissão de CO₂ para diferentes materiais utilizados em residências unifamiliares brasileiras baseadas em alvenaria, em kgCO₂/unidade funcional variável.

Material e unidade funcional	Descrição	Emissão de CO₂ (kg) mínima	Emissão de CO₂ (kg) máxima
Concreto 20 MPa (m ³)	Concreto dosado em central, com ou sem incorporação de aditivos	168,8	283,5
	Concreto dosado em obra, em traço 1:2:3	257,1	335,2
Aço CA-50 (kg)	Barra nervurada com f _{yk} de 500 MPa. O indicador em unidade de massa possibilita a conversão para diferentes diâmetros de barra.	0,426	1,061
Madeira estrutural (m ³)	Madeira serrada aplainada seca em estufa – pinus	19,06	39,15
Chapas de OSB (kg)	Chapas duplas de 1,9 cm	0,519	0,519
Argamassas (m ³)	Dosada em obra 1:6	202,5	268,3
	Dosada em obra 1:2:9	258,8	317,7
	Dosada em obra 1:4	272,3	357,7
	Dosada em obra 1:1:6	283,2	348,4
	Dosada em obra 1:2:8	270,1	330,9
	Dosada em obra 1:3	332,8	436,4
Bloco cerâmico (unidade)	Entre 9x19x19 cm e 11,5x14x25 cm	0,138	0,352
Bloco de concreto (unidade)	Bloco de vedação de 2 MPa, 14x19x39 cm	0,3668	0,7351
	Bloco estrutural de 4 MPa, 14x19x39 cm	0,392	1,08
Lã de vidro (kg)	90 mm de espessura	2,7	2,7
Filme de polietileno (kg)	0,2 mm de espessura	2,3	2,3
Drywall (kg)	Para revestimento interno, 12,5 mm de espessura	0,347	0,347
Adesivo de poliuretano	Para colagem da madeira no sistema CLT	2,83	2,83

Fonte: Ecoinvent (2023), Orlandini (2021) e Sidac – Sistema de Informação do desempenho ambiental (2024), com dados coletados por Belizario-Silva, Oliveira e John (2022), Costa Reis e John (2022), Schmalfuss, Timm e Passuello (2022), Pulgrossi e Silva (2022), Oliveira *et al.* (2022), Sonvezzo e John (2022), Cleto, Von Mühlen e Belizario-Silva (2022), Sonvezzo, Oliveira e John (2022) e Martins, Punhagui e John (2022).

Para facilitar o cruzamento dos indicadores de emissão de CO₂ com os indicadores de consumo apresentados na Tabela 8, os indicadores de emissão adotados para as fôrmas de madeira, argamassas, blocos cerâmicos e blocos de concreto foram convertidos em kgCO₂/kg de material. Foram utilizados os “fatores de conversão para kg” disponibilizados na página de cada produto dentro do sistema Sidac, apresentados na Tabela 17. Nos casos em que os indicadores de consumo foram fornecidos em unidades compatíveis com as dos produtos do Sidac, a conversão não foi feita – foi o caso do concreto usinado e do concreto dosado em obra. Para os sistemas baseados em madeira, apenas a madeira sofreu este processo. Os indicadores referentes aos materiais utilizados para a alvenaria de áreas molhadas nos sistemas mata-junta e macho e fêmea não foram convertidos, pois os indicadores de consumo e de emissão apresentavam as mesmas unidades desde a fonte consultada.

Tabela 17 — Fatores de conversão adotados para diferentes materiais utilizados em residências unifamiliares brasileiras baseadas em alvenaria e os respectivos indicadores de emissão de CO₂, em kgCO₂/kg de material.

Material	Fator de conversão adotado	Emissão de CO₂ mínima (kgCO₂/kg)	Emissão de CO₂ máxima (kgCO₂/kg)
Madeira serrada aplainada seca em estufa – pinus	530 kg/m ³	0,036	0,074
Argamassa dosada em obra 1:2:9	2204 kg/m ³	0,117	0,144
Argamassa dosada em obra 1:2:8	2153,1 kg/m ³	0,125	0,154
Argamassa dosada em obra 1:3	2326,1 kg/m ³	0,143	0,187

(Continua na próxima página)

Argamassa dosada em obra 1:6	2329,9 kg/m ³	0,087	0,115
Argamassa dosada em obra 1:4	2327,9 kg/m ³	0,117	0,154
Argamassa dosada em obra 1:1:6	2248,8 kg/m ³	0,126	0,155
Blocos cerâmicos entre 9x19x19 cm e 11,5x14x25 cm	Entre 2.1 e 2.3 kg/un. (adotado: 2.2 kg/un.)	0,063	0,16
Bloco de concreto estrutural de 4 MPa, 14x19x39 cm	11,8 kg/un.	0,033	0,091

Fonte: A autora, com base em Sidac – Sistema de Informação do desempenho ambiental (2024).

Vale ressaltar que, em alguns dos casos, não foi possível correlacionar os materiais especificados pelas fontes que forneceram os indicadores de consumo com os materiais disponibilizados no Sidac com exatidão. A Tabela 18 abaixo faz a correlação de cada insumo com os produtos do catálogo Sidac cujo indicador de emissão de CO₂ foi adotado.

Tabela 18 — Correlação adotada entre insumos especificados por projeto e insumos do catálogo Sidac, para cada modelo residencial baseado em alvenaria (R1-B, PMCMV e MAB).

Modelo	Insumo especificado para consumo	Produto Sidac adotado
R1-B	Concreto	Concreto dosado em obra, traço 1:2:3
	Argamassas	Média das argamassas dosadas em obra 1:2:9 e 1:3
	Blocos cerâmicos	Valores mínimos e máximos considerando blocos cerâmicos entre 9x19x19 cm e 11,5x14x25 cm
	Aço	Vergalhões de aço CA-50
	Fôrmas de madeira	Madeira serrada bruta seca em estufa - pinus
PMCMV	Concreto	Concreto dosado em central 20 MPa
	Argamassa 1:1:8 para assentamento da alvenaria	Média entre a argamassa dosada em obra 1:1:6 e a 1:2:8
	Argamassa 1:4 para revestimento	Argamassa dosada em obra 1:4
	Blocos de concreto	Bloco de concreto estrutural f_{bk} 04 MPa (14x19x39 cm)
	Aço	Vergalhão de aço CA-50
MAB	Concreto	Concreto dosado em obra, traço 1:2:3
	Blocos de concreto	Bloco de concreto estrutural f_{bk} 04 MPa (14x19x39 cm)
	Argamassa 1:1/2:6 para assentamento da alvenaria	Média entre a argamassa dosada em obra 1:1:6 e a 1:6
	Argamassa 1:4 para revestimento	Argamassa dosada em obra 1:4
	Aço	Vergalhão de aço CA-50

Fonte: Autoria própria.

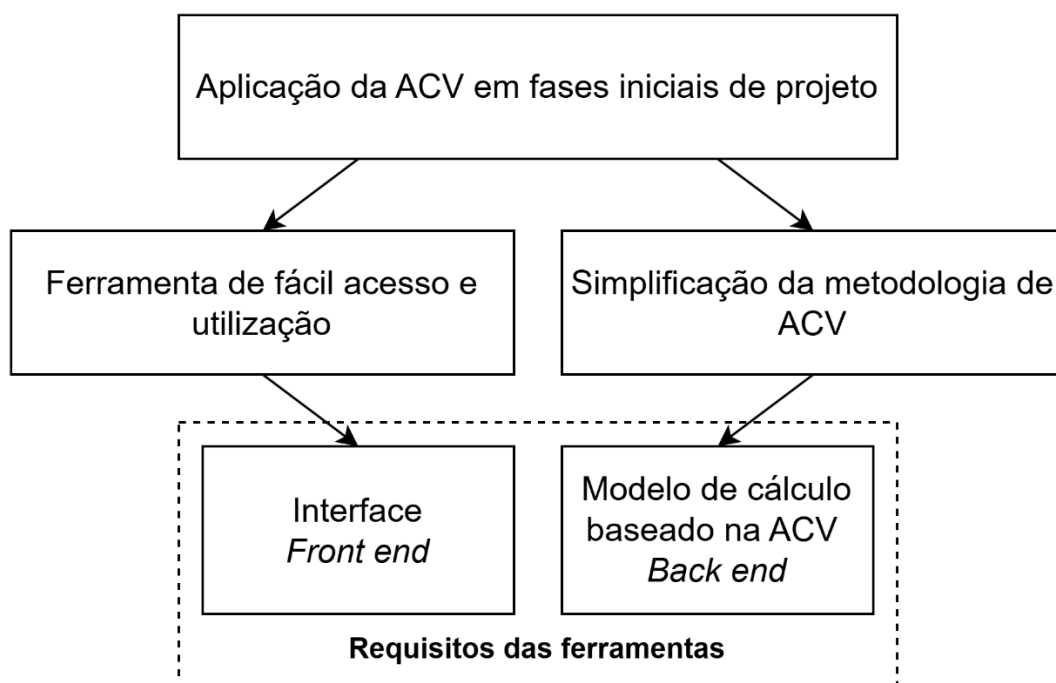
3.3 Elaboração de uma ferramenta simplificada para estimativa de CO₂ emitido para a construção de casas no Brasil

A elaboração de uma ferramenta simplificada consistiu em utilizar os indicadores numéricos de impacto ambiental encontrados nas etapas anteriores para criar uma plataforma digital, gratuita e de livre acesso para estimativa de

emissões de CO₂, voltada para estudantes de arquitetura e leigos em Avaliação do Ciclo de Vida.

Inicialmente, existem duas peças principais na criação de qualquer ferramenta digital ou *software*: a interface do usuário (*front end*) e o modelo de cálculo (*back end*) (Meex *et al.*, 2018). A função da primeira é facilitar a navegação do usuário, permitir a inserção dos dados de projeto necessários e garantir uma boa visualização dos resultados. Por outro lado, a função da segunda envolve o funcionamento da ferramenta, com base em uma série de regras previamente programadas. A Figura 9 apresenta um diagrama de como essas informações formam os dois requisitos gerais para a concepção da ferramenta.

Figura 9 – Abordagem metodológica para o desenvolvimento de ferramentas de ACV.



Fonte: Adaptado de Rohrmann [s.d.].

Em relação ao formato adequado para essa ferramenta, Hollberg *et al.* (2021) e Apellániz (2021) apontam dificuldades em trabalhar com o formato de *plugin*, a exemplo do TallyLCA para Autodesk Revit. Rohrmann [s.d.] e Haschke (2022), por

outro lado, trabalham com o formato de *web application*, *webapp* ou aplicação web, que consiste em um *software* acessado por meio do navegador, sem necessidade de instalação. Os exemplos de Rohrmann [s.d.] e Haschke (2022) mostraram-se exitosos para ferramentas de ACV que avaliam edificações dentro do escopo estrutural, nas primeiras fases do ciclo de vida.

Tendo como referência esses trabalhos, foi escolhido o formato de aplicação *web*, em linguagem Java Script, utilizando o *software* Visual Studio Code. O código completo é disponibilizado no Apêndice A deste documento. Para programar a ferramenta e suas funcionalidades, foi necessário primeiro estabelecer quais seriam (a) os dados de entrada (informações dadas pelo usuário à ferramenta), (b) os dados de saída (informações que a ferramenta retorna ao usuário) e (c) os indicadores adotados para cada cenário possível a partir dos modelos residenciais estudados. A Tabela 19 apresenta os critérios que foram estabelecidos para cada um desses itens, em resposta aos objetivos da pesquisa.

Tabela 19 — Critérios para a construção da ferramenta simplificada.

Itens constituintes da ferramenta		
Dados de entrada	Dados de saída	Indicadores adotados
Devem ser os mínimos possíveis, de forma a facilitar a escolha de usuários leigos. Além disso, o modo de inserção dos dados de entrada deve ser amigável ao usuário, de forma que não exija conhecimentos informáticos específicos.	Atender os seguintes critérios: • Rapidez de interpretação; • Facilidade de comparação entre cenários; • Uso de gráficos familiares ao potencial usuário; • Clareza na comunicação dos resultados; • Suporte à tomada de decisão; • Comunicação de imprecisões.	Os indicadores adotados na ferramenta devem ser estabelecidos a partir da avaliação e interpretação dos resultados do presente estudo. É importante ressaltar que os indicadores adotados refletem estimativas, que carregam um nível de incerteza.

Fonte: Autoria própria, com base em Rohrmann [s.d.] e Hollberg *et al.* (2021).

A partir da premissa de que para criar uma ferramenta simplificada é necessário adotar um método simplificado, os indicadores de emissão de CO₂

foram estabelecidos em função da área da edificação projetada, de modo que o usuário possa estimar o impacto da construção de um projeto residencial unifamiliar a partir de apenas dois dados de entrada: (i) a área construída em m² e (ii) o sistema construtivo adotado no projeto que se pretende avaliar. Desse modo, a ferramenta devolve ao usuário dados de saída referentes às emissões estimadas para aquele projeto de edificação.

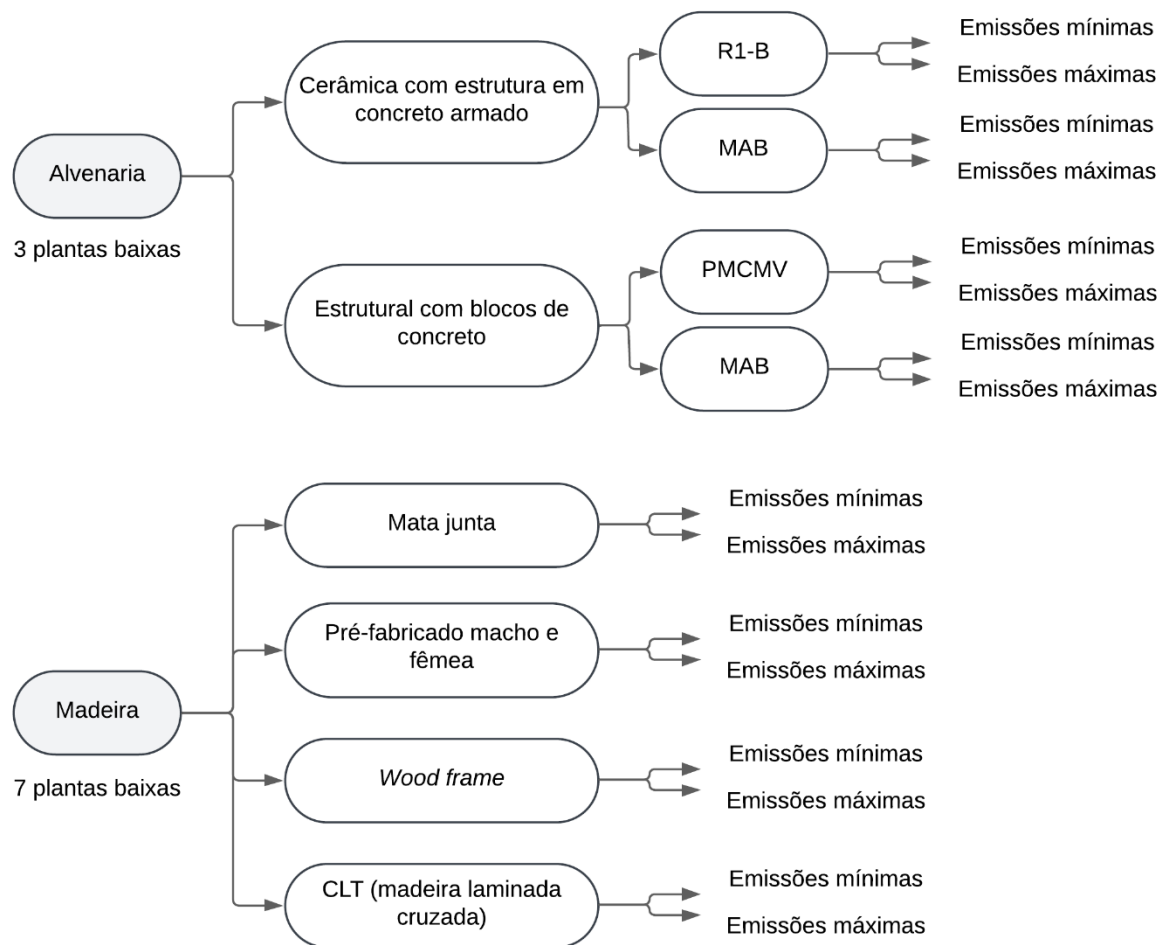
Para atender aos critérios determinados para os dados de saída, algumas tecnologias *web* foram implementadas como parte do método de concepção da ferramenta. São elas:

- A biblioteca JavaScript “React.js”, empregada para a criação de uma interface do usuário amigável e com atualização dinâmica dos componentes gráficos;
- A biblioteca “Chart.js” para visualização dos dados, empregada para renderizar os gráficos interativos;
- Uma função de lógica de recálculo automático, que consiste em recalcular automaticamente as emissões totais da edificação sempre que o usuário fizer alterações nos dados de entrada (área do projeto e sistema construtivo), evitando inconsistência e falta de clareza nos resultados apresentados.

Por fim, os indicadores de emissão de CO₂ adotados tiveram origem em Avaliações de Ciclo de Vida do CO₂ em diferentes cenários, e foram validados por estudos de caso e por comparação com os dados disponíveis na literatura. A Figura 10 ilustra os diferentes cenários que foram considerados para a formulação dos indicadores incorporados à ferramenta. No total, foram considerados seis diferentes sistemas construtivos, em modelos baseados em dez diferentes plantas de residência unifamiliar brasileira. Para cada possível cenário, foram

estimadas as emissões mínimas e máximas de CO₂ para a construção das casas especificadas, dentro do recorte considerado no estudo.

Figura 10 – Fluxograma dos diferentes cenários considerados para a definição dos indicadores de emissão de CO₂ adotados na ferramenta simplificada proposta.



Fonte: Autoria própria.

Referências do capítulo

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Mãos à obra**. São Paulo: ABCP, 32 p., 2010. Disponível em: https://cimento.org/wp-content/uploads/2010/06/M_OBRA.pdf. Acesso em: 21 jan. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edificações habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro, 2006. 91 p. Versão corrigida em janeiro de 2021.

AMIRI, Ali; OTTELIN, Juudit; SORVARI, Jaana; JUNNILA, Seppo. Cities as carbon sinks—classification of wooden buildings. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 9, art. 094076, ago. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba134>. Acesso em: 21 jan. 2025.

APELLÁNIZ, Diego; PASANEN, Panu; GENGNAGEL, Christoph. A Holistic and Parametric Approach for Life Cycle Assessment in the Early Design Stages. In: ANNUAL SYMPOSIUM ON SIMULATION FOR ARCHITECTURE AND URBAN DESIGN (SIMAUD), 12., 2021, [online]. **Proceedings of the 12th Annual Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design**. San Diego: Society for Computer Simulation International, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/354193697_A_Holistic_and_Parametric_Approach_for_Life_Cycle_Assessment_in_the_Early_Design_Stages. Acesso em: 20 jan. 2025.

Araujo, Victor Almeida de. Casas de madeira e o potencial de produção no Brasil. 2018. 368 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais). Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.11.2018.tde-22032018-113405>. Acesso em: 21 jan. 2025.

BATISTA, Fábio Domingos. A tecnologia construtiva em madeira na região de Curitiba: da casa tradicional à contemporânea. 2007. 181 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/90136>. Acesso em: 21 jan. 2025.

BELIZARIO-SILVA, Fernanda; OLIVEIRA, Lidianne Santana; REIS, Daniel Costa; PATO, Gabriel Torres Gomes; MARINHO, Arthur Coser; DEGANI, Clarice Menezes; CALDAS, Lucas Rosse; PUNHAGUI, Katia Regina Garcia; PACCA, Sérgio Almeida; JOHN, Vanderley Moacyr. The Sidac system: Streamlining the assessment of the embodied energy and CO2 of Brazilian construction products. **Journal of**

Cleaner Production, v. 421, art. 138461, out. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623026197>. Acesso em: 20 jan. 2025.

BELIZARIO-SILVA, Fernanda; OLIVEIRA, Luciana Alves; JOHN, Vanderley Moacyr. Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: cimento. São Paulo: Sidac, 2022. Disponível em: https://sidac.org.br/documentos/Sidac_Cimento.pdf. Acesso em: 22 jan. 2025.

BERGMAN, Richard; PUETTMANN, Maureen; TAYLOR, Adam; SKOG, Kenneth E. The Carbon Impacts of Wood Products. **Forest Products Journal**, v. 64, n. 7-8, p. 220-231, dez. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-14-00047>. Acesso em: 21 jan. 2025.

Börjesson, Pål; Gustavsson, Leif. Greenhouse gas balances in building construction: wood versus concrete from life-cycle and forest land-use perspectives. **Energy Policy**, v. 28, n. 9, p. 575–588, jul. 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00049-5](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00049-5). Acesso em: 21 jan. 2025.

BRASIL. Lei nº 11.977, de 7 de julho de 2009. Dispõe sobre o Programa Minha Casa, Minha Vida – PMCMV e a regularização fundiária de assentamentos localizados em áreas urbanas; altera o Decreto-Lei nº 3.365, de 21 de junho de 1941, as Leis nºs 4.380, de 21 de agosto de 1964, 6.015, de 31 de dezembro de 1973, 8.036, de 11 de maio de 1990, e 10.257, de 10 de julho de 2001, e a Medida Provisória nº 2.197-43, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: Brasília, DF, p. 7, 7 jul. 2009.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Guia dos beneficiários - Programa Minha Casa, Minha Vida (PMCMV)**, 2023. Dispõe sobre perguntas frequentes, regras e orientações para o PMCMV. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/habitacao/programa-minha-casa-minha-vida/guia-dos-beneficiarios-2013-programa-minha-casa-minha-vida-pmcmv>. Acesso em: 27 dez. 2024.

CAIXA Econômica Federal. **Cadernos CAIXA: Projeto padrão – casas populares**. Vitória: GIDUR/VT, 36 p., 2006. Disponível em: https://www.caixa.gov.br/Downloads/banco-projetos-projetos-HIS/casa_37m2.pdf. Acesso em: 21 jan. 2025.

CLETO, Fabiana da Rocha; VON MÜHLEN, João Felipe; BELIZARIO-SILVA, Fernanda. Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do

Desempenho Ambiental da Construção: blocos e telhas cerâmicos. São Paulo: SIDAC, 2022.

COSTA, Bruno Luis de Carvalho. Quantificações das Emissões de CO₂ Geradas na Produção de Materiais Utilizados na Construção Civil no Brasil. 2012. 208 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/pt/dissertacoes-de-mestrado/112-msc-pt-2012/2251-bruno-luis-de-carvalho-da-costa>. Acesso em: 20 jan. 2025.

COSTA REIS, Daniel; JOHN, Vanderley. Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: Concreto. São Paulo: Sidac, 2022.

CEN. **EN 15978:2011 – Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method**. Brussels: European Committee for Standardization, 2011.

FEARNSIDE, Philip M. Forests and global warming mitigation in Brazil: opportunities in the Brazilian forest sector for responses to global warming under the “clean development mechanism.”. **Biomass and Bioenergy**, v.16, n. 3, p. 171–189, mar. 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(98\)00071-3](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(98)00071-3). Acesso em: 21 jan. 2025.

HASCHKE, Niklas; BOLLINGER+GROHMANN. Structural WebApp. Online: Structural WebApp, [2025]. Disponível em: <https://structural-webapp.vercel.app/>. Acesso em: 21 jan. 2025.

HERTWICH, Edgar G.; ALI, Saleem; CIACCI, Luca; FISHMAN, Tomer; HEEREN, Niko; MASANET, Eric; ASGHARI, Farnaz Nojavan; OLIVETTI, Elsa; PAULIUK, Stefan; TU, Qingshi; WOLFRAM, Paul. Material efficiency strategies to reducing greenhouse gas emissions associated with buildings, vehicles, and electronics—a review. **Environmental Research Letters**, v. 14, n. 4, art. 043004, abr. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab0fe3>. Acesso em: 21 jan. 2025.

HOLLBERG, Alexander; KISS, Benedek; RÖCK, Martin; SOUST-VERDAGUER, Bernardette; WIBERG, Aoife Houlihan; LASVAUX, Sebastien; GALIMSHINA, Alina; HABERT, Guillaume. Review of visualising LCA results in the design process of buildings. **Building and Environment**, v. 190, art. 107530, mar. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107530>. Acesso em: 20 jan. 2025.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14067:2018 – Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification**. Geneva, 2018. Versão corrigida em 2024.

MARTINS, Karine Hilgenberg; PUNHAGUI, Katia Regina Garcia; JOHN, Vanderley Moacyr. Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: cal. São Paulo: Sidac, 2022.

MEEEX, Elke; HOLLBERG, Alexander; KNAPEN, Elke; HILDEBRAND, Linda; VERBEECK, Griet. Requirements for applying LCA-based environmental impact assessment tools in the early stages of building design. **Building and Environment**, v. 133, p. 228–236, abr. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.02.016>. Acesso em: 21 jan. 2025.

MICROSOFT. Visual Studio Code. Redmond: Microsoft, 2023. Disponível em: <https://code.visualstudio.com/>. Acesso em: 21 jan. 2025.

ROHRMANN, Jacqueline. Towards sustainable design decision-making: Development of an early-stage assessment tool for Building design concepts and visualization of their embodied greenhouse gas emissions. **TBG Consult**. Online: [2025]. Disponível em: https://static1.squarespace.com/static/6283eece1817005f3d3a222a/t/646b980ed817b627ffa65256/1684772882971/Master+Thesis_Final_Online+Version.pdf. Acesso em: 21 jan. 2025.

OLIVEIRA, Cássio Gomes; FISCHER, Anna Claudia; SANCHOTENE, Camila Yara dos Santos; TAVARES, Sérgio Fernando; PUNHAGUI, Katia Regina Garcia. Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: Toras de madeira, madeira serrada bruta e madeira serrada apilada. São Paulo: Sidac, 2022.

ORLANDINI, Luana Caroline. Estratégias para redução das emissões de CO₂ e o aumento de estoque temporário de carbono do setor da construção por meio do uso da madeira. 2021. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2021. Disponível em: <https://dspace.unila.edu.br/server/api/core/bitstreams/a25a54a7-6fa6-446d-a24d-127214fb7ca0/content>. Acesso em: 21 jan. 2025.

ORLANDINI, Luana Caroline; PUNHAGUI, Katia Regina Garcia. Strategies to reduce CO₂ emissions and increase temporary carbon stock in Brazilian housing using planted wood. **Environmental Development**, v. 49, art. 100946, mar. 2024.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2023.100946>. Acesso em: 20 jan. 2025.

PHILIPPI, Rodrigo Vinci. Caracterização do mercado de casas pré-fabricadas de madeira em Curitiba e região metropolitana. 2014. 66f. Monografia (Especialização em Construções Sustentáveis). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/17398>. Acesso em: 21 jan. 2025.

PROIETTI, Stefania; SDRINGOLA, Paolo; DESIDERI, Umberto; ZEPPARELLI, Francesco; MASCIARELLI, Francesco; CASTELLANI, Francesco. Life Cycle Assessment of a passive house in a seismic temperate zone. **Energy and Buildings**, v. 64, p. 463–472, set. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.05.013>. Acesso em: 20 jan. 2025.

PULGROSSI, Lizzie Monique; SILVA, Vanessa Gomes. Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: vergalhão de aço CA-50. São Paulo: Sidac, 2022.

PUNHAGUI, Katia Regina. Potencial de reducción de las emisiones de CO₂ y de la energía incorporada en la construcción de viviendas en Brasil mediante el incremento del uso de la madera. 2014. 422 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Doutorado em Engenharia Civil). Universidad Politécnica de Cataluna y Universidade de São Paulo, Barcelona, 2014. Disponível em: <https://www.tdx.cat/handle/10803/279369#page=3>. Acesso em: 21 jan. 2025.

ROLNIK, Raquel (org.); BISCHOF, Raphael; KLINTOWITZ, Danielle; REIS, Joyce. **Como produzir moradia bem localizada com recursos do Programa Minha Casa Minha Vida? Implementando os instrumentos do Estatuto da Cidade**. Brasília: Ministério das Cidades, 132 p., 2010.

SCHMALFUSS, Ludimila Mallmann; TIMM, Janaíne; PASSUELLO, Ana Carolina Badalotti. Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: minerais. São Paulo: Sidac, 2022.

SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. **Utilização da madeira certificada na construção civil: um diferencial**. São Paulo: SEBRAE, 2014. Disponível em: [https://bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/85b6536c4c6a77cd4e6148c57e44ff6a/\\$File/2014_08_07_RT_junho_ConstrucaoCivil_FSC.pdf.pdf](https://bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/85b6536c4c6a77cd4e6148c57e44ff6a/$File/2014_08_07_RT_junho_ConstrucaoCivil_FSC.pdf.pdf). Acesso em: 21 jan. 2025.

SFB – SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. Boletim SNIF 2024. Brasília: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, Sistema Nacional de Informações Florestais, 2024. Disponível em: https://snif.florestal.gov.br/images/pdf/publicacoes/Boletim_SNIF_2024.pdf. Acesso em: 21 jan. 2025.

SILVA, Julia Cruz da. Parâmetros construtivos para painéis verticais adaptados do sistema *wood frame* em madeira de eucalipto jovem. 2018. 206 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana). Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/29237>. Acesso em: 21 jan. 2025.

SINDUSCON-MG - Sindicato da Indústria da Construção Civil no Estado de Minas Gerais. **Custo Unitário Básico (CUB/m²): principais aspectos**. Belo Horizonte: SINDUSCON-MG, 2007. 112p. Disponível em: <http://cub.org.br/cartilha-cub-m2>. Acesso em: 21 jan. 2025.

SINDUSCON-SP – Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo e WWF-Brasil. **Aquisição responsável de madeira na construção civil – Guia Prático para Construtoras**. São Paulo: WWF, 2011. Disponível em: https://martmadeiras.com.br/wp-content/uploads/2023/11/manual_aquisicao_responsavel_sinduscon.pdf. Acesso em: 21 jan. 2025.

Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (Sidac). 2022. Disponível em <https://Sidac.org.br/>.

SOUZA, Ubiraci Espinelli Lemes de; PALIARI, José Carlos; ANDRADE, Artemária Coêlho de; AGOPYAN, Vahan. Os valores das perdas de materiais nos canteiros de obras do Brasil. In: Congresso Latino-Americano Tecnologia e Gestão na Produção de Edifícios: Soluções para o Terceiro Milênio, 1998, São Paulo. **Anais do Congresso Latino-Americano Tecnologia e Gestão na Produção de Edifícios: Soluções para o Terceiro Milênio**. São Paulo: PCC-USP, v.1, p.355-361, nov. 1998.

SONVEZZO, Carolina Strabelli; JOHN, Vanderley Moacyr. Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: argamassas. São Paulo: SIDAC, 2022.

SONVEZZO, Carolina Strabelli; OLIVEIRA, Lidiane Santada; JOHN, Vanderley Moacyr. Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do

Desempenho Ambiental da Construção: blocos de concreto. São Paulo: Sidac, 2022.

TECVERDE ENGENHARIA. Documento de Avaliação Técnica: “Sistema estruturado em peças leves de madeira maciça serrada – Tecverde (tipo light wood framing)”. DATec 020-E. Curitiba: Tecverde Engenharia, 2023. Disponível em: <https://www.tecverde.com.br/wp-content/uploads/2023/05/DATec-020-E.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2025.

UNEP - United Nations Environment Programme. **Building Materials and the Climate: Constructing a New Future..** Nairobi: UNEP, 2023. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/report/building-materials-and-climate-constructing-new-future>. Acesso em: 21 jan. 2025.

WBCSD - World Business Council for Sustainable Development. **Decarbonizing construction: Guidance for investors and developers to reduce embodied carbon.** Geneva: WBCSD, 2021. Disponível em: <https://archive.wbcsd.org/Programs/Cities-and-Mobility/Sustainable-Cities/Transforming-the-Built-Environment/Decarbonization/Resources/Decarbonizing-construction-Guidance-for-investors-and-developers-to-reduce-embodied-carbon>. Acesso em: 21 jan. 2025.

WORLD GREEN BUILDING COUNCIL. **EU Policy Whole Life Carbon Roadmap.** London: World GBC, 2022. Disponível em: <https://viewer.ipaper.io/worldgbc/eu-roadmap/?page=2>. Acesso em: 21 jan. 2025.

ZABALZA, Ignacio; SCARPELLINI, Sabina; ARANDA, Alfonso; LLERA, Eva; JÁÑEZ, Alberto. Use of LCA as a Tool for Building Ecodesign. A Case Study of a Low Energy Building in Spain. **Energies**, v. 6, n. 8, p. 3901–3921, ago. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en6083901>. Acesso em: 20 jan. 2025.

ZANI, Antonio Carlos. **Arquitetura em Madeira.** Londrina: EDUEL, 2013. E-book. Disponível em: <https://www.eduel.com.br/ebook-arquitetura-em-madeira-pdf.html>. Acesso em: 21 jan. 2025.

RESULTADOS

O presente capítulo apresenta as emissões de CO₂ obtidas a partir do método apresentado no Capítulo 3. Primeiro, são apresentados os resultados para os modelos residenciais baseados em alvenaria, referentes ao R1-B, PMCMV e MAB. Em seguida, são apresentados resultados para a construção de casas do mesmo padrão em sistemas construtivos baseados em madeira. Por fim, apresenta-se uma comparação entre os diferentes cenários. Em todos os casos, foi feita uma ACVCO₂ (ACV que contabiliza apenas as emissões de CO₂), considerando a envoltória vertical das residências. A discussão dos resultados é apresentada em seguida, no Capítulo 5, demonstrando a representatividade dos achados para este campo de estudo.

4.1 Modelo residencial R1-B

Primeiramente, a Tabela 20 apresenta as emissões de CO₂, mínimas e máximas, para cada insumo considerado para a produção de uma casa unifamiliar convencional no Brasil, no cenário R1-B. Os valores apresentados refletem o CO₂ emitido para um metro quadrado de área construída. Na última linha, é apresentado o valor total de emissões de uma casa nesse cenário.

Tabela 20 – Emissões de CO₂ para cada insumo necessário para construir uma casa brasileira no modelo R1-B, em kgCO₂ por metro quadrado de área construída.

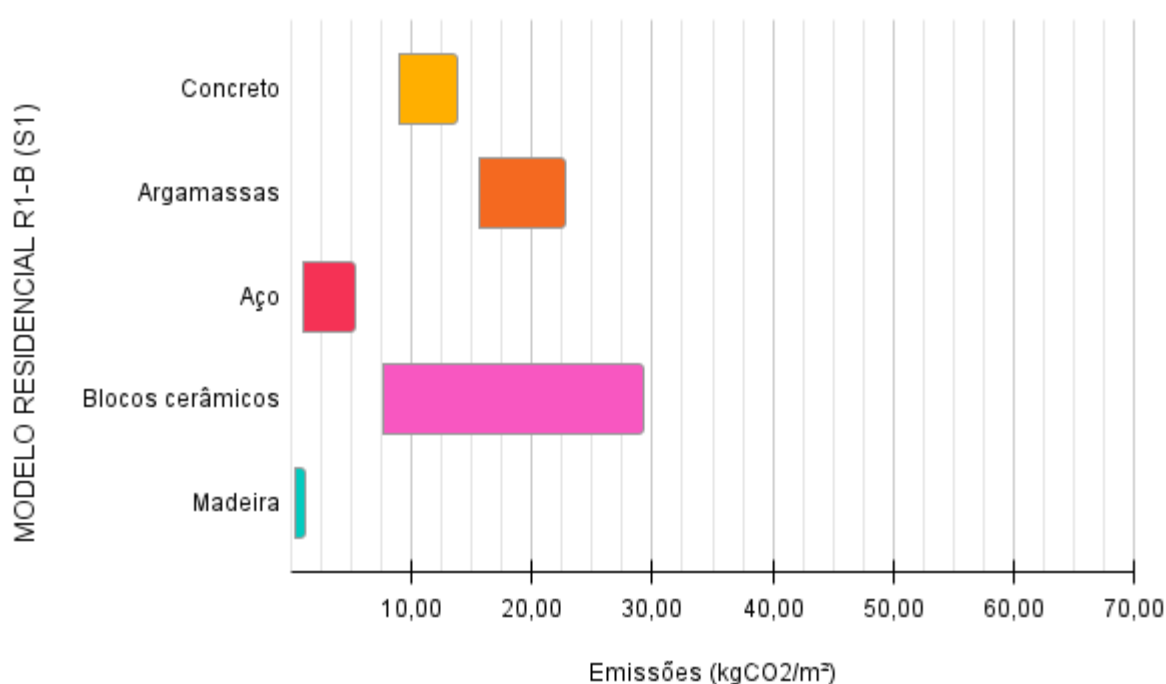
Insumo	Emissão mínima, em kgCO ₂ /m ²	Emissão média, em kgCO ₂ /m ²	Emissão máxima, em kgCO ₂ /m ²
Concreto	9,08	11,40	13,72
Argamassas	15,68	19,16	22,63
Aço	1,02	3,13	5,24
Blocos cerâmicos	7,75	18,43	29,12
Madeira	0,33	0,67	1,02
Total (kgCO₂/m²)	33,85	52,76	71,73

Fonte: Autoria própria.

Em termos de emissões médias, os resultados mostrados na Tabela 20 mostram que as argamassas e os blocos cerâmicos são os materiais mais impactantes no modelo R1-B, enquanto a madeira para fôrmas é o material menos impactante. Entretanto, destaca-se que nesse modelo residencial foram consideradas variações no consumo de material e no fator de emissão por material, o que torna indispensável entender como essas variações afetam as emissões mínimas e máximas apresentadas acima.

Para isso, Figura 11 ilustra os valores encontrados de modo comparativo, permitindo enxergar não só a proporção do impacto por material, como também o nível de incerteza das emissões por materiais, representados pelo tamanho das barras. Uma barra maior indica uma variação maior entre as emissões máximas e mínimas atribuídas ao metro quadrado construído, para determinado material, e, portanto, uma maior incerteza na estimativa das emissões desse insumo.

Figura 11 – Emissões de CO₂ por cada insumo necessário para construir uma casa brasileira do tipo R1-B, em kgCO₂/m² de área construída.



Fonte: Autoria própria.

Nota-se que o material de maior impacto em potencial são os blocos cerâmicos, cuja produção emite entre 7,75 e 29,12 kgCO₂ por metro quadrado construído. É também o material cuja estimativa de emissões é mais variável. No caso dos blocos cerâmicos, essa variação está ligada ao processo de produção do material - em especial, Cleto, Von Mühlen e Belizario-Silva (2022) destacam, no inventário dos blocos fabricados no Brasil, a variação dos dados relacionados à origem da lenha e seu consumo.

A variação do nível de emissão por metro quadrado construído das argamassas é a segunda maior, e está, em grande parte, ligada à variação das dimensões dos blocos cerâmicos. Em relação ao concreto, existe uma variação ligada principalmente à variação do nível de emissão, questão intrínseca à metodologia adotada pelo Sidac para obter os fatores de emissão, conforme destaca o *market share* apresentado em Reis e John (2022).

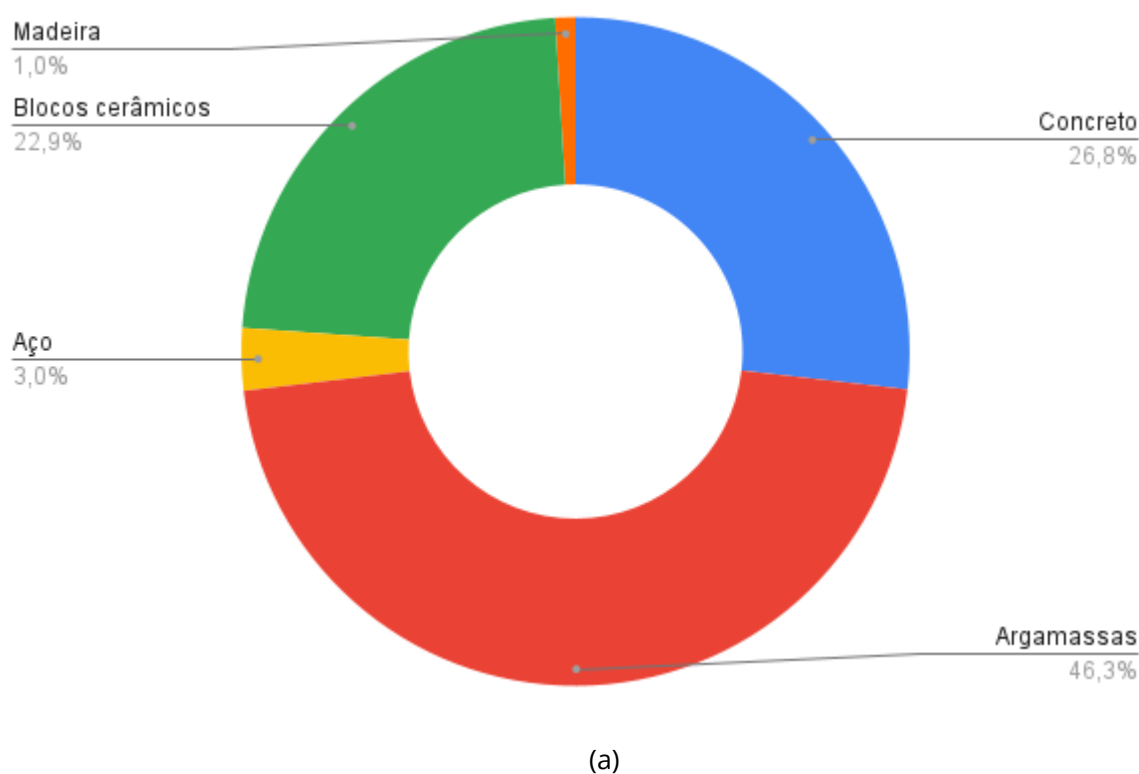
Em relação à madeira utilizada para as fôrmas, o fator que mais varia é o nível de emissões de CO₂ por unidade funcional.

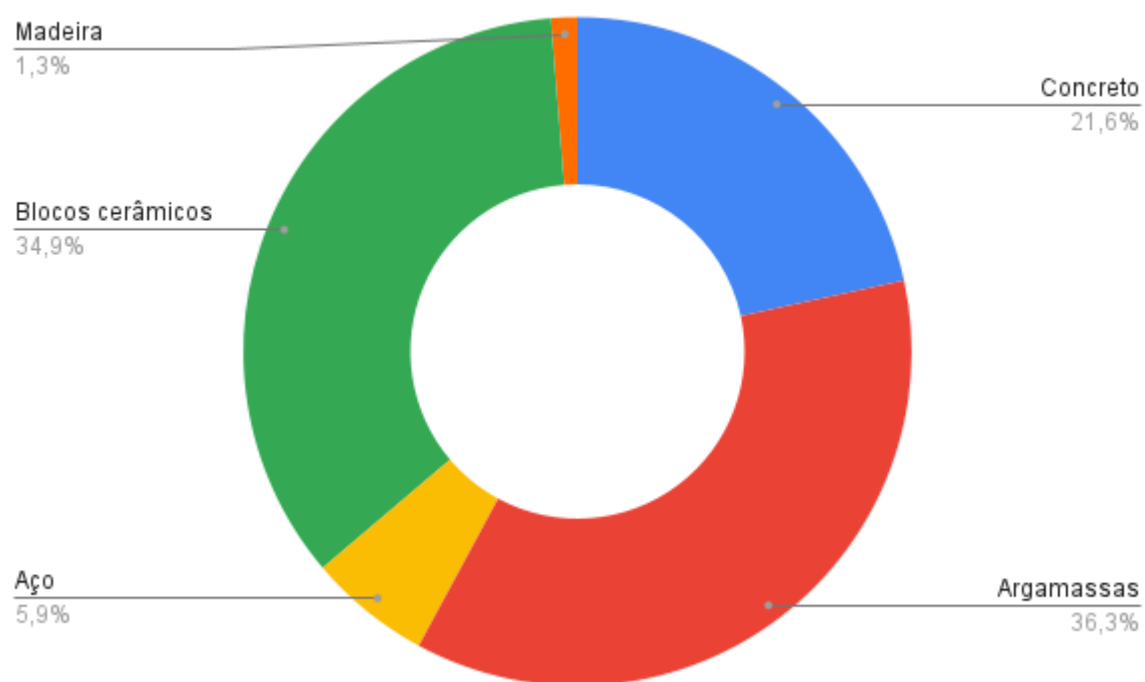
Em relação ao aço e à madeira, o fator que mais varia é o nível de emissões de CO₂ por unidade funcional do material. Entretanto, pelos valores absolutos de emissões e consumo do material serem inferiores em comparação com os outros materiais, essas variações afetam menos indicadores gerais do modelo R1-B.

De maneira geral, essas variações explícitas nos resultados obtidos reforçam a necessidade da coleta de dados primários em grande escala, junto aos fabricantes de materiais no Brasil. Uma iniciativa do tipo pode auxiliar o setor da construção no processo de estimativa de impactos ambientais, como a que pode ser feita por meio da ACV. Além disso, a análise dos inventários e fluxos de processos detalhados pode ajudar a identificar os pontos críticos da produção desses materiais e incentivar os fabricantes a buscarem alternativas.

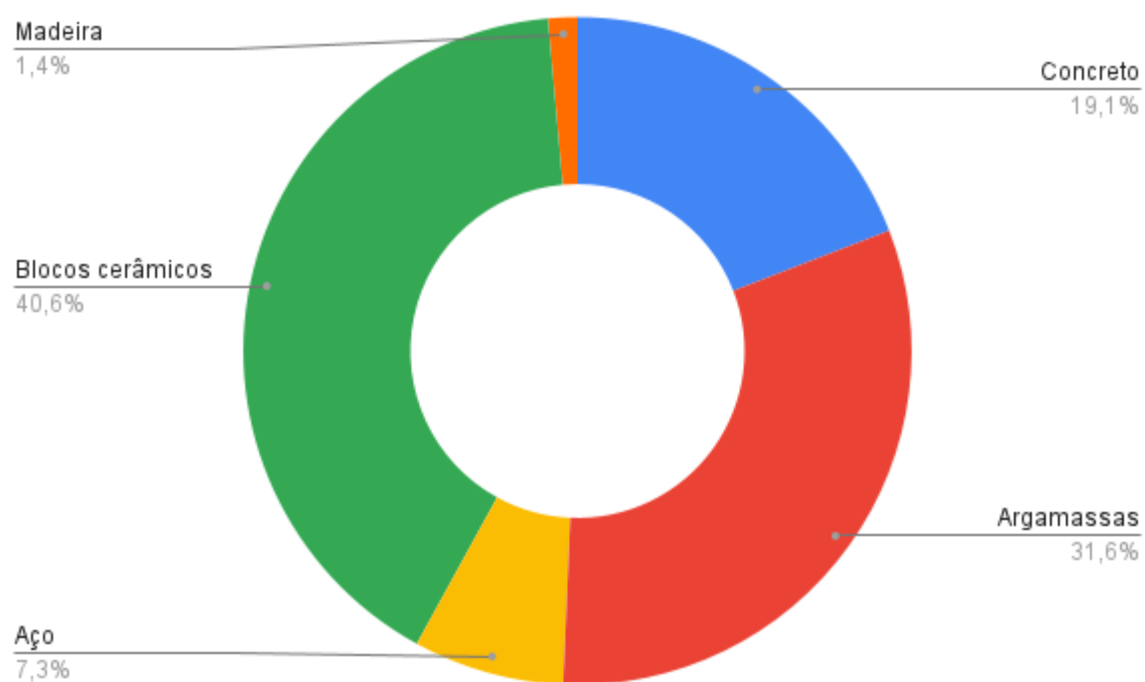
Tendo isso em vista, a Figura 12 compara cenários de consumo e emissões mínimas, médias e máximas, para identificar como as variações podem influenciar no impacto percentual de cada material da edificação. Nesse sentido, são apresentadas as frações de impacto de cada insumo em cenários (a) de consumo mínimo e emissões mínimas, (b) de consumo médio e emissões médias e (c) de consumo máximo e emissões máximas. Para o cenário (b) foi utilizado o valor médio entre os apresentados na Tabela 20.

Figura 12 – Impacto percentual por insumo em cenários (a) de consumo mínimo e emissões mínimas, (b) de consumo médio e emissões médias e (c) de consumo máximo e emissões máximas, no modelo residencial R1-B.





(b)



(c)

Fonte: Autoria própria.

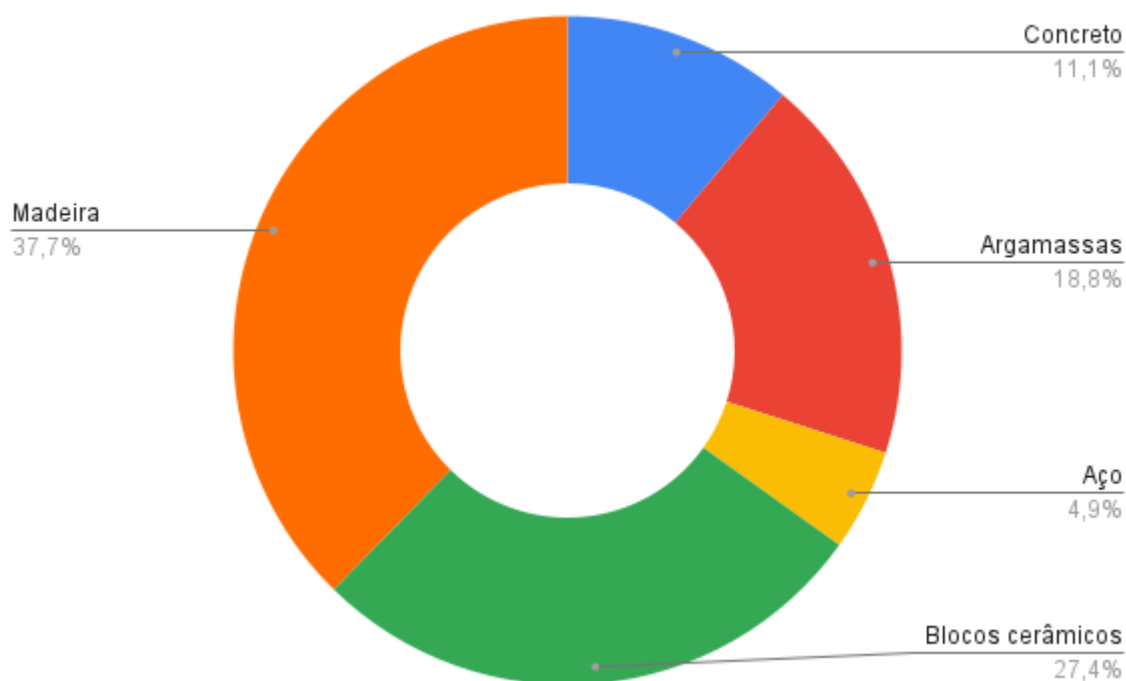
De maneira geral, percebe-se que a fração do impacto das argamassas na residência R1-B pode representar entre 31,6% e 46,3% das emissões totais de CO₂

da casa. Os blocos cerâmicos, que representam o segundo tipo de insumo mais impactante, representam entre 23% e 40,6% das emissões totais.

Para os materiais cimentícios (argamassas e concreto), percebe-se que quanto maior o consumo de materiais e maior o fator de emissão adotado no geral, menor é o impacto global dos dois tipos de insumo, e maior é o impacto dos demais insumos. Assim, é possível dizer que, em larga escala de construção, adotando o maior fator de emissão possível, a redução do consumo dos materiais cimentícios pode significar não apenas uma redução significativa nas emissões totais da edificação ou do empreendimento dessa tipologia, mas também uma redução do impacto relativo do concreto e da argamassa em comparação aos outros insumos.

Para demonstrar essa hipótese, a Figura 13 abaixo apresenta o impacto percentual por insumo, simulando a construção de um empreendimento com 400 unidades residenciais no modelo R1-B, adotando os maiores níveis de emissão para todos os materiais, e os maiores níveis de consumo para todos os materiais com exceção dos cimentícios, para os quais adotou-se o menor nível de consumo possível.

Figura 13 – Impacto percentual por insumo em um cenário de otimização do consumo de materiais cimentícios, para um empreendimento de 400 unidades de residências modelo R1-B.



Fonte: Autoria própria.

Os resultados da simulação dessa possibilidade em grande escala confirmam a hipótese levantada, ao mostrar que os materiais cimentícios podem chegar a representar, juntos, menos de 30% das emissões totais do empreendimento – uma redução de 20% em comparação com a Figura 12c.

Já para os outros tipos de insumo restantes (madeira e aço), é possível dizer que há uma relação inversa – em cenários de maior consumo e emissões (Figura 12c), eles representam uma fração maior do impacto total da casa, e o contrário vale para os cenários de menor consumo e emissões (Figura 12a).

Em síntese, a partir do método adotado para avaliação do R1-B, é possível afirmar que os materiais cimentícios representam, em todos os cenários, ao menos a metade do impacto relacionado ao potencial de aquecimento global da construção de uma residência brasileira em concreto armado, dentro do recorte considerado. A fração de impacto somada do cimento e argamassas varia entre

cerca de 50% para o cenário de máximo consumo e máximas emissões e 73% para o cenário de consumo e emissões mínimas. Adotando valores médios para todos os insumos, a fração de impacto dos materiais cimentícios ficaria em 58%.

4.2 Modelo residencial PMCMV

A Tabela 21 apresenta as emissões de CO₂, mínimas e máximas, para cada insumo considerado para a produção de uma casa unifamiliar convencional no Brasil, no modelo PMCMV. Os valores apresentados refletem o CO₂ emitido para um metro quadrado construído. Na última linha, é apresentado o valor total de emissões para um metro quadrado construído de uma casa nesse cenário. Em seguida, a Figura 14 apresenta esses valores a fim de comparar os níveis de emissão por material.

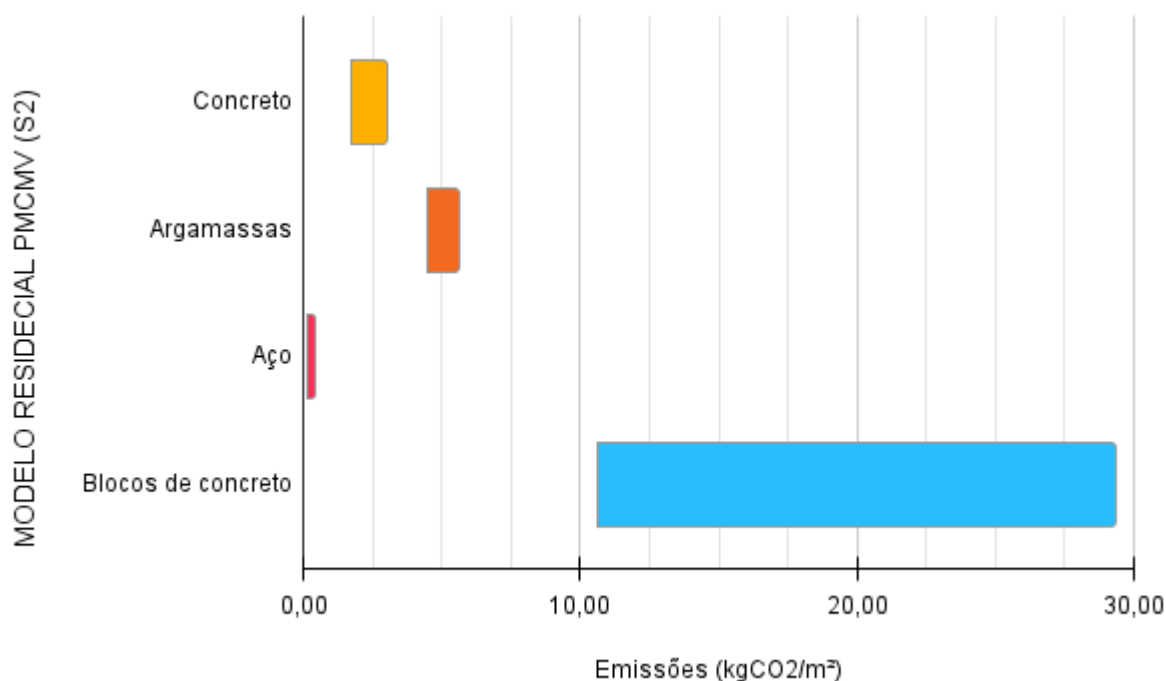
Tabela 21 – Emissões de CO₂ para cada insumo necessário para construir uma casa brasileira no modelo PMCMV, em kgCO₂ por metro quadrado de área construída.

Insumo	Emissão mínima, em kgCO ₂ /m ²	Emissão média, em kgCO ₂ /m ²	Emissão máxima, em kgCO ₂ /m ²
Concreto	1,77	2,38	2,98
Argamassas	4,55	5,09	5,63
Aço	0,16	0,28	0,41
Blocos de concreto	10,63	19,98	29,32
Total (por m²)	17,12	27,73	38,33

Fonte: Autoria própria.

Neste caso, as incertezas em relação ao CO₂ incorporado são mais evidentes para os blocos de concreto, cujas emissões variam em aproximadamente 18,7 kg CO₂/m². Essa variação está próxima a encontrada para os blocos cerâmicos no caso do R1-B, que ficou na casa dos 21,4 kgCO₂/m². Neste caso, está relacionada exclusivamente à incerteza dos dados de emissões de CO₂ do Sidac adotados, visto que os dados de consumo no cenário PMCMV não variam (ver Tabela 9).

Figura 14 – Emissões de CO₂ por cada insumo necessário para construir uma casa típica brasileira do tipo PMCMV, em kgCO₂/m² de área construída.



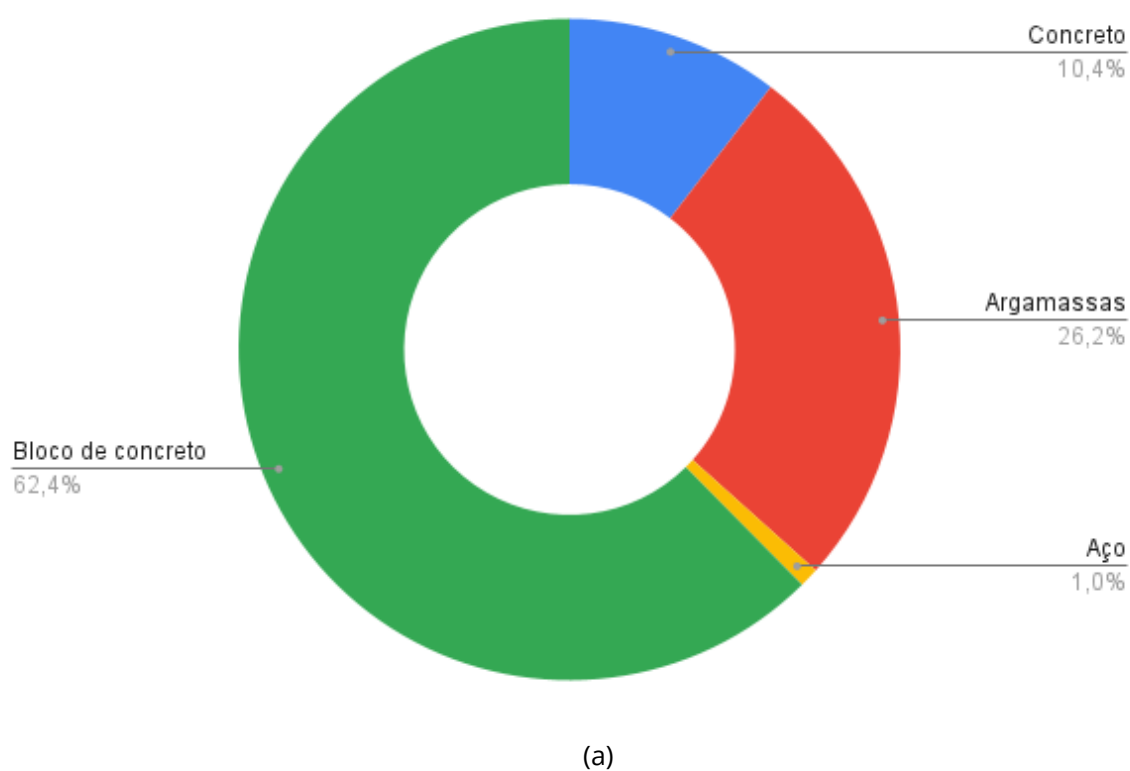
Fonte: Autoria própria.

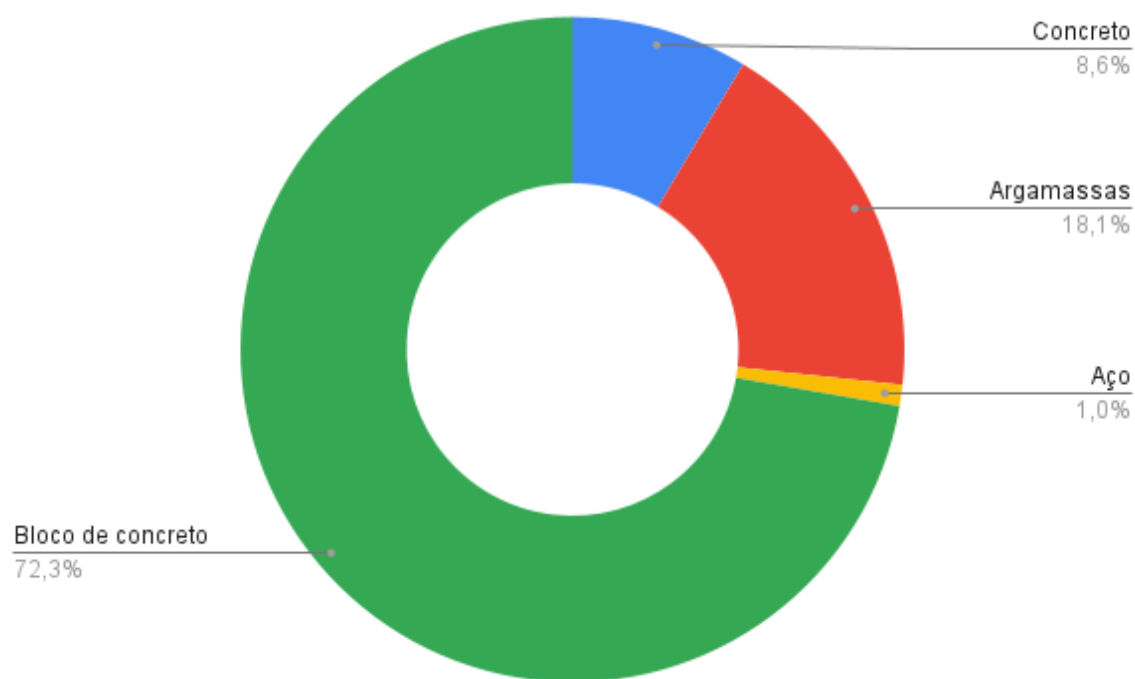
Em relação às frações de impacto que cada insumo tem na construção do modelo PMCMV, apresentadas na Figura 15 em cenários (a) de emissões mínimas, (b) de emissões médias, usando o valor médio entre os apresentados na Tabela 21, e (c) de emissões máximas, é possível dizer que os blocos de concreto são responsáveis pela maior parte das emissões do modelo residencial. Para o cenário (c), pode chegar a representar cerca de $\frac{3}{4}$ de todo o impacto.

Além disso, destaca-se que o impacto do concreto de 20 MPa fica entre 8% e 10%, e o das argamassas entre 14,5% e 26%, aproximadamente, casos nos quais é possível perceber uma tendência similar àquela vista no caso R1-B: quanto mais crítico o cenário (maior fator de emissão adotado para cada material), menos impacto o concreto e as argamassas terão. Contudo, nesse caso, como o método de avaliação do modelo PMCMV não prevê variação no consumo dos materiais, essa mudança na fração de impacto do concreto e argamassa é, na verdade, um

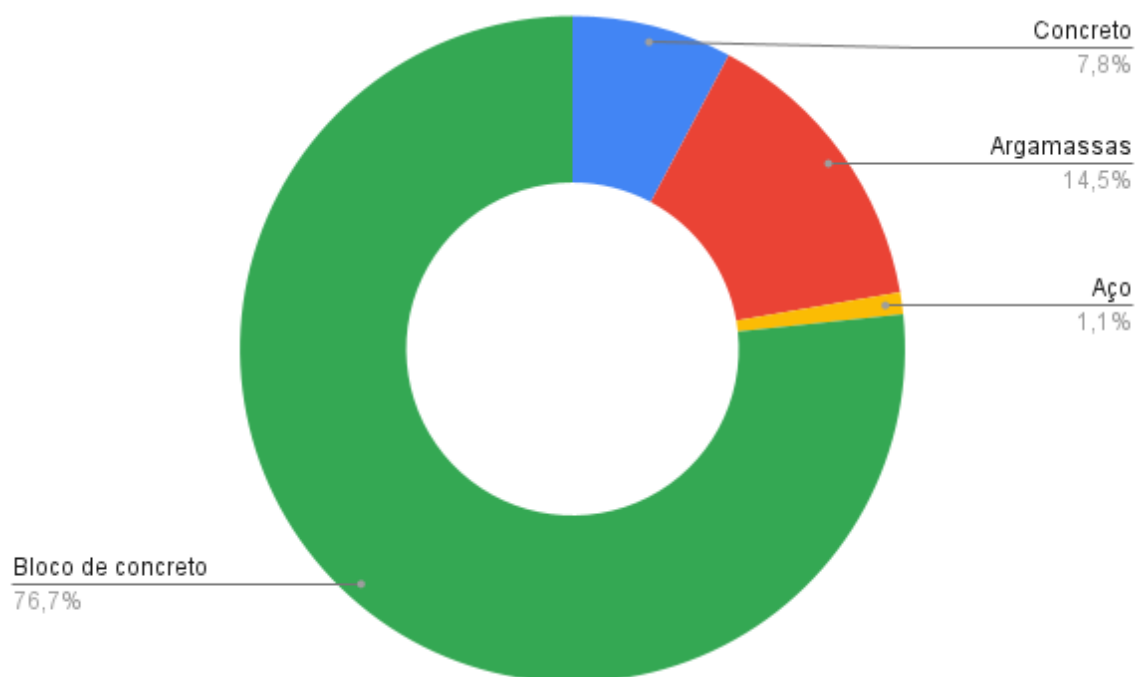
reflexo do aumento do impacto dos blocos de concreto, proporcional ao fator de emissão mais elevado que esse material carrega. Adicionalmente, é possível notar que o percentual de impacto do aço em relação ao modelo PMCMV não varia muito entre os três cenários, devido aos seus baixos fatores de emissão por metro quadrado (ver Tabela 9).

Figura 15 – Impacto percentual por insumo em cenários de (a) emissões mínimas, (b) emissões médias e (c) emissões máximas, no modelo residencial PMCMV.





(b)



(c)

Fonte: Autoria própria.

Em resumo, o método adotado para avaliação do PMCMV resulta em valores de emissão de CO_2/m^2 de área construída inferiores ao R1-B, quando

comparamos a Tabela 20 com a Tabela 21. Apesar dos sistemas construtivos serem diferentes, o consumo de cada insumo no modelo PMCMV, é no geral bastante inferior que o consumo considerado no R1-B. A única exceção, é o bloco utilizado para vedação, que apresenta valores semelhantes de emissão por m² nos dois cenários – mesmo que o R1-B utilize blocos cerâmicos e o PMCMV utilize blocos de concreto – com valores médios de 18,43 kgCO₂/m² no R1-B e 19,98 kgCO₂/m² no PMCMV.

4.3 Modelo residencial MAB

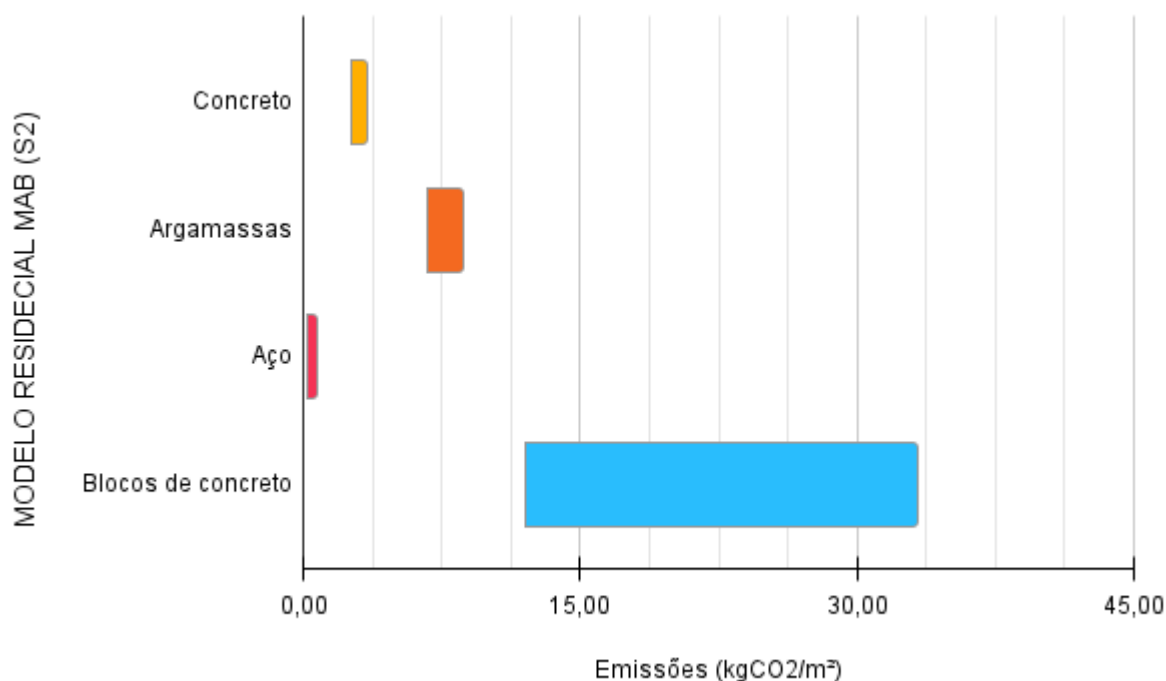
A Tabela 22 apresenta as emissões de CO₂, mínimas e máximas, para cada insumo considerado para a produção de uma casa unifamiliar convencional no Brasil, no cenário de construção de uma residência MAB em alvenaria estrutural com blocos de concreto (sistema S2). Os valores apresentados refletem o CO₂ emitido para um metro quadrado construído. É possível ver que, para o metro quadrado construído de uma casa nesse cenário, são estimadas emissões entre 21,7 kgCO₂/m² e 46 kgCO₂/m². Abaixo, o nível de incerteza de emissões por material é ilustrado pela Figura 16.

Tabela 22 – Emissões de CO₂ para cada insumo necessário para construir uma casa brasileira no modelo MAB em sistema S2, em kgCO₂ por metro quadrado de área construída.

Insumo	Emissão mínima, em kgCO ₂ /m ²	Emissão média, em kgCO ₂ /m ²	Emissão máxima, em kgCO ₂ /m ²
Concreto	2,64	3,04	3,44
Argamassas	6,73	7,68	8,62
Aço	0,27	0,47	0,67
Blocos de concreto	12,06	22,66	33,26
Total (por m²)	21,7	33,85	46

Fonte: Autoria própria.

Figura 16 – Emissões de CO₂ por cada insumo necessário para construir uma casa brasileira do tipo MAB em sistema S2, em kgCO₂/m² de área construída.



Fonte: Autoria própria.

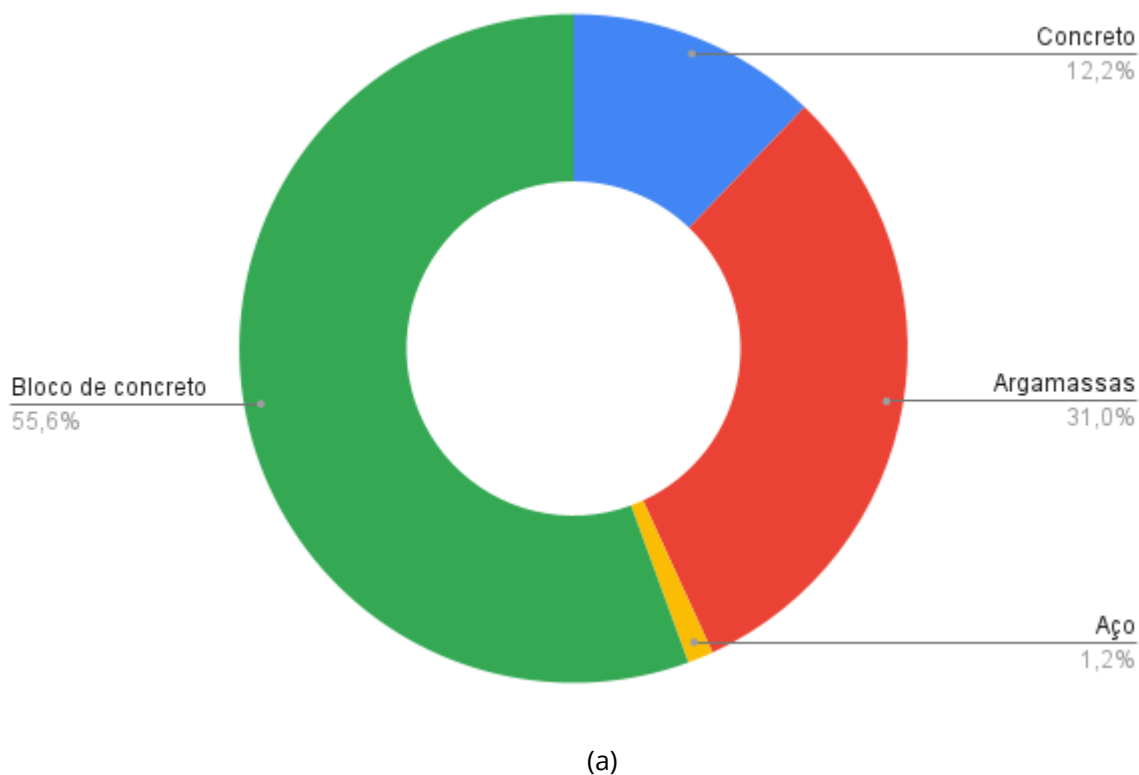
No geral, os resultados são similares aos encontrados para o modelo PMCMV. Neste caso, as emissões máximas totais para o modelo residencial MAB são cerca de 20% maiores do que as encontradas para o modelo PMCMV de mesmo sistema construtivo. O aumento das emissões, por sua vez, tem relação com os valores de emissão por m² mais elevadas para o concreto, o aço, e os blocos de concreto. No primeiro caso, as emissões são mais elevadas por conta dos fatores de emissão do concreto 1:2:3 dosado em obra, que são maiores do que os de concreto usinado, de acordo com o Sidac (2024). Já nos casos do aço e dos blocos de concreto, as emissões por m² no MAB são maiores que no modelo PMCMV por conta do consumo adotado para cada material, que também é maior no MAB.

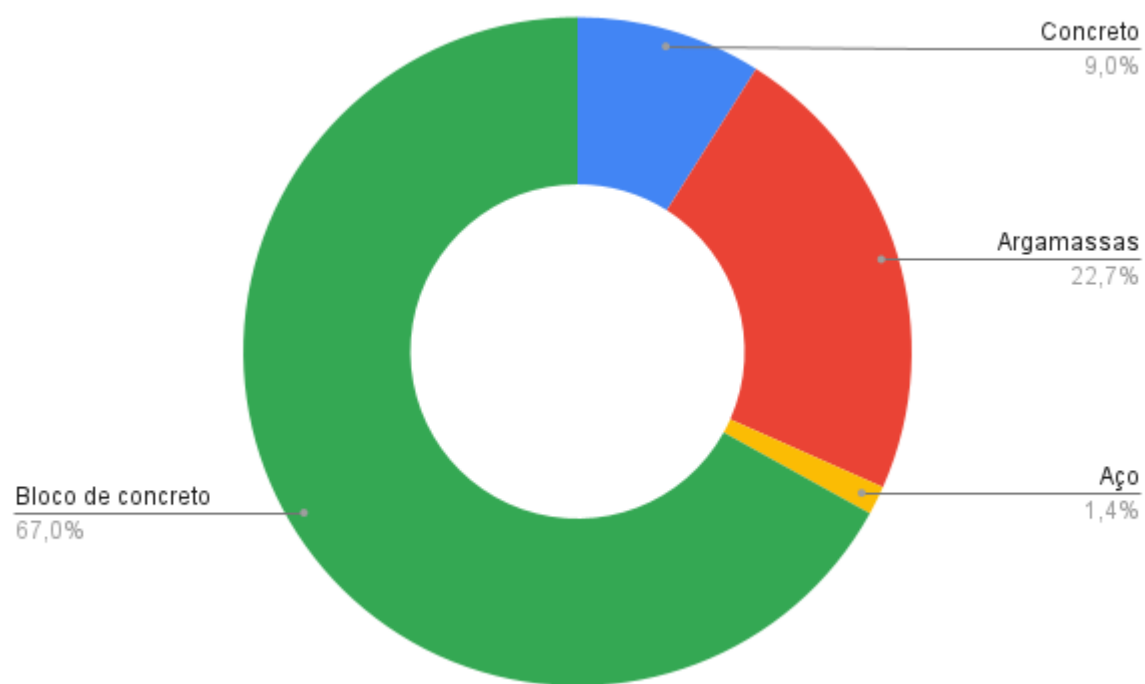
Cabe ressaltar que, neste modelo (MAB em alvenaria estrutural), o nível de variação dos indicadores de emissões de CO₂ dos materiais por área construída é ditado unicamente pela imprecisão dos dados do Sidac, visto que não há insumos

com indicadores de consumo variáveis nesse cenário, assim como no PMCMV (ver Tabela 10).

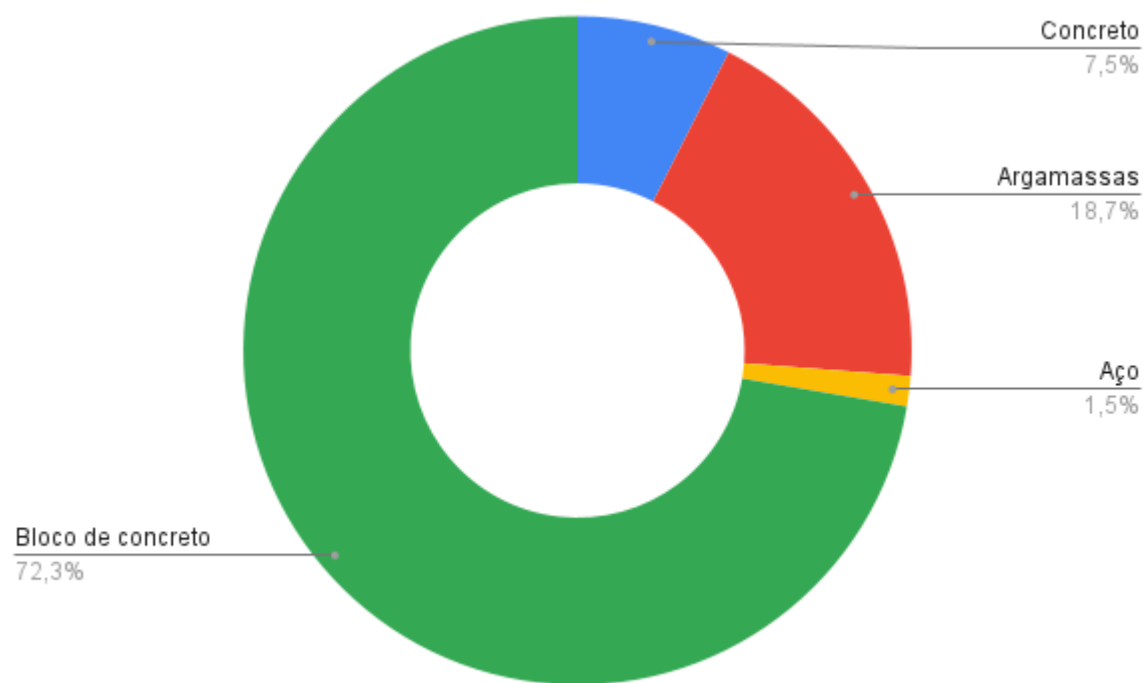
A Figura 17 mostra a fração do impacto de cada um dos insumos para a construção de uma casa no modelo MAB em sistema S2, em cenários (a) de consumo mínimo e emissões mínimas, (b) de consumo médio e emissões médias (valor médio entre os apresentados na Tabela 22) e (c) de consumo máximo e emissões máximas.

Figura 17 – Impacto percentual por insumo em cenários (a) de consumo mínimo e emissões mínimas, (b) de consumo médio e emissões médias e (c) de consumo máximo e emissões máximas, no modelo residencial MAB em sistema S2.





(b)



(c)

Fonte: Autoria própria.

De maneira geral, as mesmas observações feitas em 4.2 se mantêm. Para o método adotado no estudo de caso do MAB, os blocos de concreto são mais impactantes em relação ao todo do que no caso PMCMV. Da mesma forma, as argamassas são menos impactantes em relação ao todo, e o aço é mais impactante, para todos os cenários, em comparação com o PMCMV.

Assim, os resultados da avaliação do MAB em sistema S2 reforçam os resultados do PMCMV, mesmo tendo adotado abordagens diferentes. Além disso, validam que, em todos os cenários avaliados, mais da metade do impacto relacionado ao potencial de aquecimento global da construção de uma residência típica brasileira em alvenaria estrutural é proveniente dos blocos de concreto. Para o MAB, a fração do impacto para esses materiais oscila entre 55,6% no cenário (a) e 72,3% no cenário (c). Esses dados mostram a relevância de estudos que aplicam a ACV à escala dos materiais na arquitetura, conforme apresentado na RSL da seção 2.2.1 – em especial, o estudo de novas composições para blocos de vedação, que possam mitigar os impactos causados pelo uso dos materiais convencionais cimentícios.

Além disso, também foram simulados cenários de construção do modelo MAB em concreto armado com vedação cerâmica (sistema S1, também adotado para o R1-B). A Tabela 23 apresenta as emissões de CO₂, mínimas e máximas, para cada insumo considerado para a produção de uma casa unifamiliar convencional no Brasil nesse sistema, por metro quadrado construído. Neste cenário, são estimadas emissões entre 32,3 kgCO₂/m² e 59,56 kgCO₂/m² - níveis de emissão similares aos encontrados para o modelo R1-B.

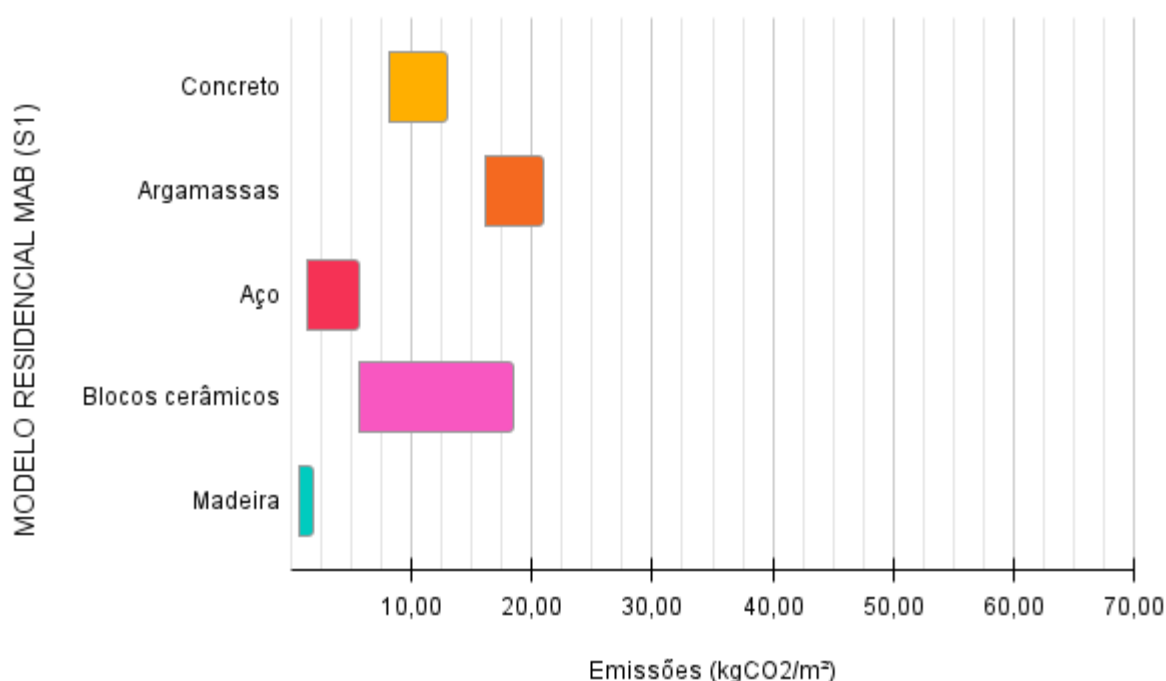
Em seguida, a variação de emissões por material é ilustrada na Figura 18. Para efeitos de comparação, é mantida a mesma escala (no eixo x) apresentada na Figura 11, referente ao R1-B.

Tabela 23 – Emissões de CO₂ para cada insumo necessário para construir uma casa brasileira no modelo MAB em sistema S1, em kgCO₂ por metro quadrado de área construída.

Insumo	Emissão mínima, em kgCO ₂ /m ²	Emissão média, em kgCO ₂ /m ²	Emissão máxima, em kgCO ₂ /m ²
Concreto	8,17	10,49	12,81
Argamassas	16,17	18,54	20,91
Aço	1,42	3,53	5,65
Blocos cerâmicos	5,77	12,07	18,37
Madeira	0,77	1,24	1,72
Total (kgCO₂/m²)	32,28	45,87	59,46

Fonte: Autoria própria.

Figura 18 – Emissões de CO₂ por cada insumo necessário para construir uma casa brasileira do tipo MAB em sistema S1, em kgCO₂/m² de área construída.



Fonte: Autoria própria.

Nota-se que, em geral, o nível de emissão para cada insumo é muito similar ao encontrado no estudo do cenário R1-B, sendo a maior diferença entre os dois cenários o nível de emissões por metro quadrado dos blocos cerâmicos. Essa diferença é explicada pelo tamanho das plantas, em área construída, que leva o

modelo residencial maior (R1-B) a ter um consumo de blocos mais elevado, e, portanto, uma maior variação nas emissões desse material por metro quadrado.

4.4 Cenários alternativos em madeira

Este item apresenta os resultados encontrados em relação à emissão de CO₂ em casas em sistemas construtivos baseados em madeira, de área construída equivalente às típicas, conforme foi apresentado em 3.1.2. Os sistemas construtivos considerados foram: pré-fabricado macho e fêmea, mata-junta, CLT e *wood frame*.

Para os sistemas em mata-junta e macho e fêmea, o método adotado identificou as emissões por metro quadrado construído de madeira e de alvenaria separadamente, conforme mostra a Tabela 24. Ambos os cenários consideram o uso de madeira plantada certificada, de acordo com os fatores de emissão de Orlandini e Punhagui (2024) e a emissão de CO₂ das áreas molhadas construídas em alvenaria (banheiros, cozinhas e lavanderias) foi calculada com base nos valores médios encontrados para os sete modelos residenciais que foram analisados.

Tabela 24 – Emissões de CO₂ para cenários em mata-junta e macho e fêmea, em kgCO₂ por metro quadrado de área construída.

Sistema construtivo	Emissão da área construída em madeira, em kgCO ₂ /m ²		Emissão da área construída em alvenaria, em kgCO ₂ /m ²	
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
Mata-junta	1	4,39	6,19	14,41
Macho e fêmea	2,05	8,69	6,19	14,41

Fonte: Autoria própria.

Para chegar a um indicador único por sistema construtivo, por área construída total, conforme foi especificado em 3.3 como requisito para a ferramenta, foi necessário considerar a proporção entre as áreas médias construídas em madeira

e em alvenaria nos sete casos. A proporção encontrada, conforme as áreas médias mostradas na Tabela 6, foi de 82% de área construída em madeira para 18% de área construída em alvenaria. Com base nisso, as Equações 1 a 4 abaixo mostram como foram quantificados os indicadores de emissão mínima e máxima para os sistemas em mata-junta (S3) e macho e fêmea (S4).

$$\text{Equação 1:} \quad \text{Indicador de emissão mínima em mata-junta} = (A \times 0,82 \times 1) + (A \times 0,18 \times 6,19) = \mathbf{1,93A}$$

$$\text{Equação 2:} \quad \text{Indicador de emissão máxima em mata-junta} = (A \times 0,82 \times 4,39) + (A \times 0,18 \times 14,41) = \mathbf{6,19A}$$

$$\text{Equação 3:} \quad \text{Indicador de emissão mínima em macho e fêmea} = (A \times 0,82 \times 2,05) + (A \times 0,18 \times 6,19) = \mathbf{2,8A}$$

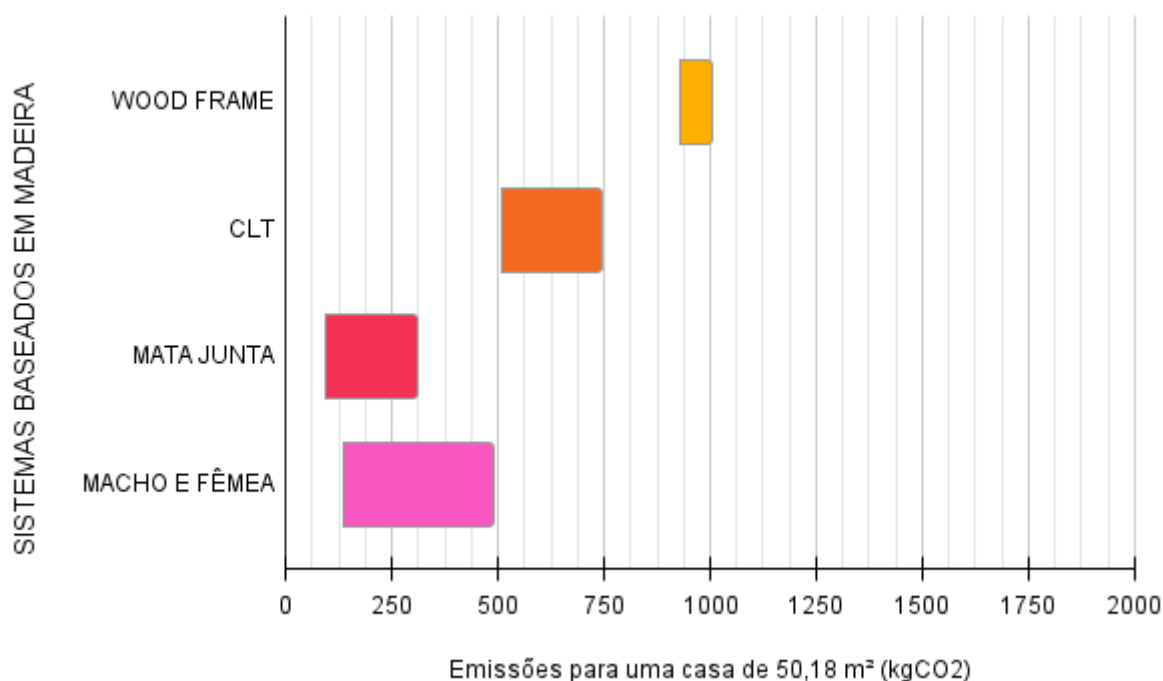
$$\text{Equação 4:} \quad \text{Indicador de emissão máxima em macho e fêmea} = (A \times 0,82 \times 8,69) + (A \times 0,18 \times 14,41) = \mathbf{9,72A}$$

Nas quais:

A = área total construída de uma casa, em metros quadrados.

Os valores encontrados foram posteriormente incorporados como indicadores de impacto ambiental (ver 4.5) na ferramenta simplificada proposta neste trabalho. A partir deles, a Figura 19 mostra um comparativo da emissão total de CO₂ para a construção de uma casa de 50,18 m², área construída média entre os sete modelos residenciais estudados para os sistemas baseados em madeira. Os dados sugerem que, em média, o *wood frame* é o sistema mais impactante em relação ao CO₂ incorporado aos insumos necessários para a construção de uma casa em madeira no Brasil. Em contrapartida, o sistema em mata-junta pode ser o menos impactante, em um cenário de consumo e emissões mínimas.

Figura 19 – Emissões de CO₂ para a construção de uma casa de 50,18 m² em diferentes sistemas construtivos em madeira no Brasil, em kgCO₂.

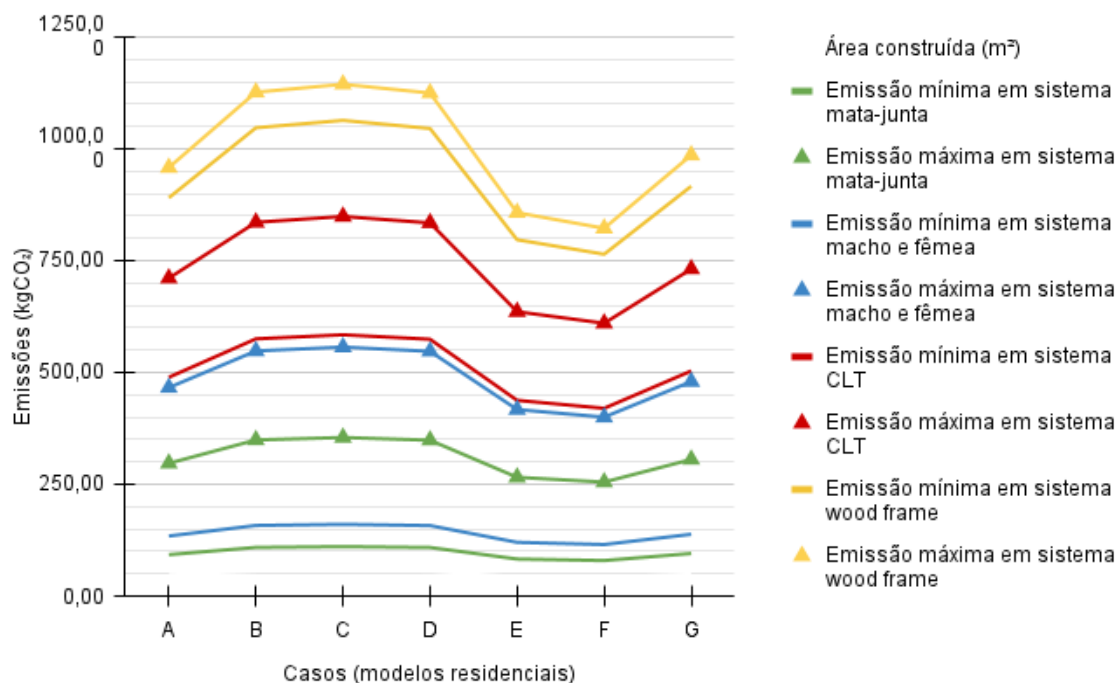


Fonte: Autoria própria.

Ainda, destaca-se que os sistemas em CLT, mata-junta e macho e fêmea tem um maior nível de incerteza em comparação ao *wood frame*. No caso do CLT, isso está ligado ao nível de incerteza no consumo de madeira. Já no caso do sistema em mata-junta ou macho e fêmea, as incertezas são consequência da imprecisão no consumo dos materiais necessários para a construção das paredes de alvenaria, que é aumentada pela variação de emissões de CO por material, principalmente para os blocos de concreto e para o aço.

Uma outra forma de analisar esses dados é por meio da avaliação de cada caso considerado. A Figura 20 apresenta as emissões mínimas e máximas para cada modelo residencial apresentado em 3.1.2, nos quatro diferentes sistemas, considerando o uso de madeira plantada. O eixo vertical apresenta os valores das emissões e, ao longo do eixo horizontal, em preto, pode-se ler a área construída de cada modelo de casa (casos A ao H).

Figura 20 – Emissões de CO₂ para cada modelo residencial em diferentes sistemas baseados em madeira, em kgCO₂.



Fonte: Autoria própria.

No geral, percebe-se que a construção de casas em *wood frame* é a mais impactante, seguida pelo sistema CLT, em todos os modelos residenciais. Nota-se também que o sistema macho e fêmea pode ou não ser mais impactante que o mata-junta. Além disso, considerando todos os casos apresentados, é possível perceber uma diferença de 1083,5 kgCO₂ entre o valor encontrado para o pior cenário (emissão máxima em sistema *wood frame*, no modelo D) e o melhor cenário (emissão mínima em sistema mata-junta, no modelo F).

De modo geral, os resultados sugerem que a estimativa de emissão de CO₂ para a construção de casas em madeira é incerta, mesmo considerando apenas casas similares em área construída similar, com o mesmo número de dormitórios e os mesmos cômodos.

4.5 Indicadores numéricos de impacto ambiental para a ferramenta simplificada

Com base nos resultados encontrados, essa seção apresenta os indicadores numéricos que foram adotados na ferramenta digital simplificada proposta por este trabalho. Conforme mostra a Tabela 25, os indicadores foram agrupados em função do sistema construtivo e são apresentados em kgCO₂/m². Os valores de emissão mínima e máxima variam em função das variações relacionadas aos dados adotados para o consumo dos materiais e para o fator de emissão de CO₂. Ressalta-se que, para o sistema construtivo S1, os limites de emissão mínima e máxima levaram em consideração o R1-B e o MAB em concreto armado, enquanto para o sistema S2, idem com os modelos PMCMV e MAB em alvenaria estrutural.

Tabela 25 — Indicadores de emissão por cenário, em kgCO₂/m².

Sistema Construtivo	Sigla	Emissão mínima, em kgCO ₂ /m ²	Emissão máxima, em kgCO ₂ /m ²
Estrutura de concreto armado e da vedação com blocos cerâmicos	S1	32,28	71,73
Alvenaria estrutural com blocos de concreto	S2	17,12	45,99
Mata-junta	S3	1,93	6,19
Macho e fêmea	S4	2,8	9,72
CLT	S5	10,2	14,82
<i>Wood frame</i>	S6	18,57	19,98

Fonte: Autoria própria.

Para avaliar o nível de variação dos indicadores, considerando a diferença entre os valores mínimos e máximos para emissão de CO₂ por cenário, adotou-se a Equação 5 abaixo.

Equação 5: $\text{Variação} = E_{\text{máx.}}/E_{\text{mín.}}$

Onde:

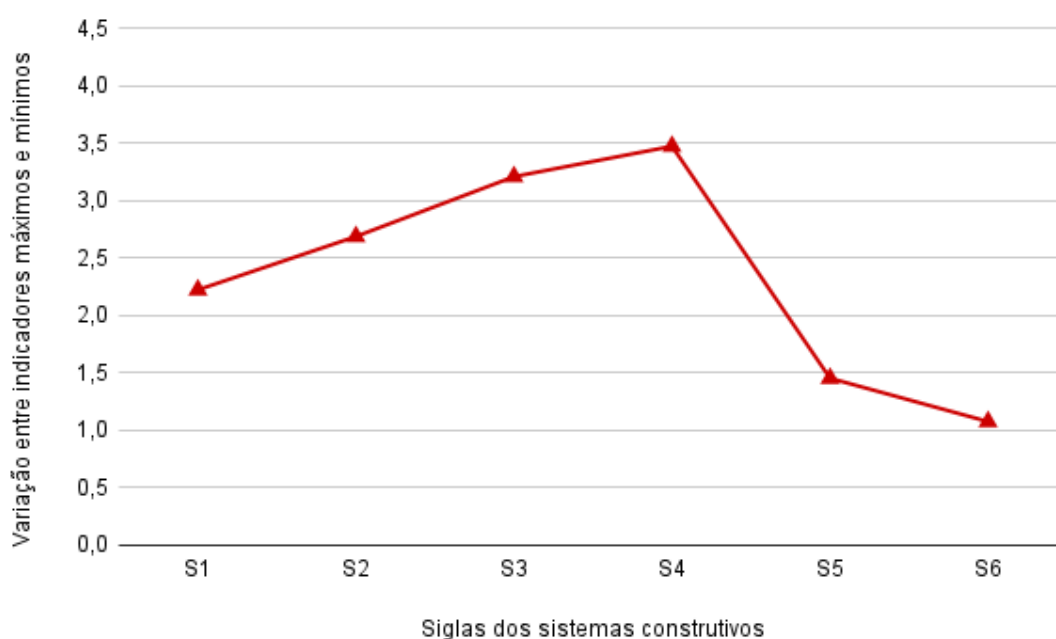
Variação = relação entre a maior emissão de CO₂ possível para uma casa de determinado sistema construtivo, e a menor emissão;

$E_{\text{máx.}}$ = Emissões máximas, em kgCO₂/m², para um sistema construtivo;

$E_{\text{mín.}}$ = Emissões mínimas, em kgCO₂/m², para um sistema construtivo.

A seguir, a Figura 21 mostra os valores encontrados para o índice de incerteza dos indicadores. No geral, a razão entre os dois diferentes níveis de emissão é sempre menor que 3,5. Destaca-se o sistema S6, com uma variação equivalente a 1,07, o que se explica pelo fato de que o único dado variável em relação às emissões foi o relativo à madeira estrutural. O mesmo aconteceu com o sistema S5, mas, nesse caso, por ter um maior consumo desse tipo de madeira, a variação ficou na casa de 1,5.

Figura 21 – Variação entre os indicadores de emissão máxima e mínima de CO₂, por sistema construtivo.



Fonte: Autoria própria.

Do mesmo modo, os sistemas S3 e S4 apresentam uma maior variação devido ao fato de terem sido consideradas mais variáveis em relação ao consumo dos materiais nesses cenários. Por outro lado, nota-se que os sistemas S1 e S2, referentes ao uso de técnicas mais convencionais no Brasil, como o concreto armado e a alvenaria estrutural, apresentam menor variação se comparados aos sistemas em mata-junta e macho e fêmea.

4.6 Ferramenta simplificada para cálculo de emissões de CO₂

A ferramenta simplificada proposta serve como uma calculadora de emissões para os casos avaliados neste trabalho, e pode ser acessada de forma digital, gratuita e de livre acesso pelo link: ferramenta-simplificada.vercel.app. Apesar de ter melhor visualização em telas maiores, funciona também em dispositivos móveis com telas menores, como *tablets* e smartphones.

Esta seção apresenta a interface do usuário (*front end*), que foi desenvolvida utilizando os indicadores numéricos de impacto ambiental apresentados nas seções anteriores, e de acordo com os critérios estabelecidos em 3.3. O código de programação da ferramenta foi disponibilizado no Apêndice A deste documento.

Primeiramente, foram estabelecidos dois dados de entrada relacionados ao projeto para o qual se quer estimar as emissões de CO₂: a área construída (m²) e o sistema construtivo adotado. A Figura 22 mostra onde o usuário deve inserir essas informações, sendo a área construída indicada em (1) e o sistema construtivo indicado em (2). Além disso, apresenta alguns outros elementos que constituem a interface do usuário: em (3) o total de emissões (mínimas e máximas), em (4) e em (5) são apresentados gráficos com informações sobre as emissões mínimas, máximas e médias, considerando os materiais utilizados nos sistemas construtivos escolhidos para avaliação.

Figura 22 – Elementos interativos da interface da ferramenta Calculadora de Emissões de Carbono (ferramenta-simplificada.vercel.app).



Fonte: Autoria própria.

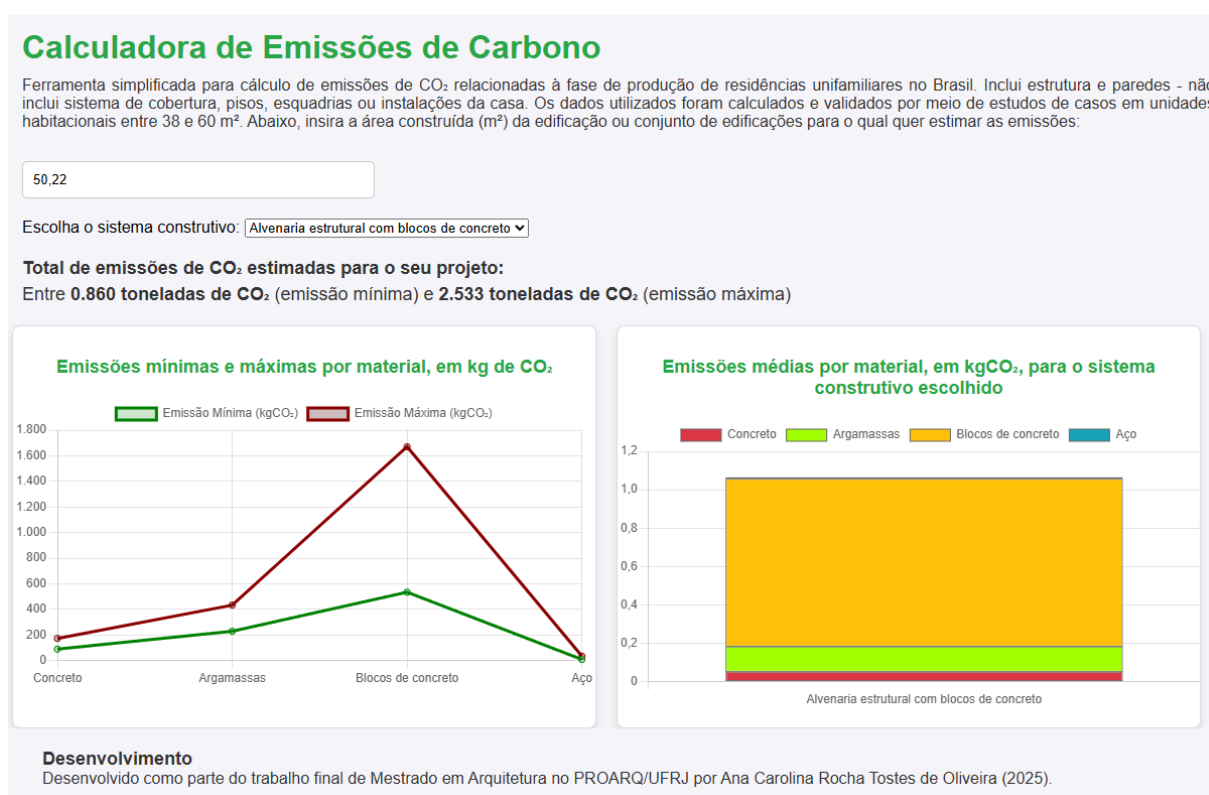
Em relação ao elemento (1), relativo ao espaço de inserção do primeiro dado de entrada, não foram impostos limites mínimos ou máximos para o valor inserido. Contudo, cabe ressaltar que uma das limitações da ferramenta é que os indicadores utilizados são baseados em estudos de casos de unidades habitacionais que têm entre 38 m² e 60 m². Portanto, é recomendado preliminarmente o uso da calculadora de emissões para unidades habitacionais de área construída entre esses limites ou próxima deles. Também é possível calcular as emissões para diversas unidades habitacionais de um mesmo empreendimento - por exemplo, para um empreendimento de 200 unidades de 40 m², digita-se em (1): 8000. Não é necessário e nem permitido digitar a unidade (m²).

Cabe ressaltar que os estudos de caso foram feitos apenas com a tipologia residencial unifamiliar. Adicionalmente, as emissões calculadas pela ferramenta não consideram o sistema de cobertura, de pisos, as esquadrias e os subsistemas de instalações. Por fim, conforme mencionado no Capítulo 3 (Metodologia), a

avaliação é estritamente relacionada às etapas A1 a A3 do ciclo de vida. Essas informações foram esclarecidas no endereço virtual da ferramenta.

Em relação ao elemento (2) da Figura 22, destaca-se que a seleção do sistema construtivo impacta no tipo de dados que serão exibidos no elemento (4), que consiste em um gráfico de linhas. Para os sistemas S1 e S2 (ver Tabela 25), serão exibidas as emissões mínimas e máximas por material, em kg de CO₂, conforme o exemplo da Figura 23.

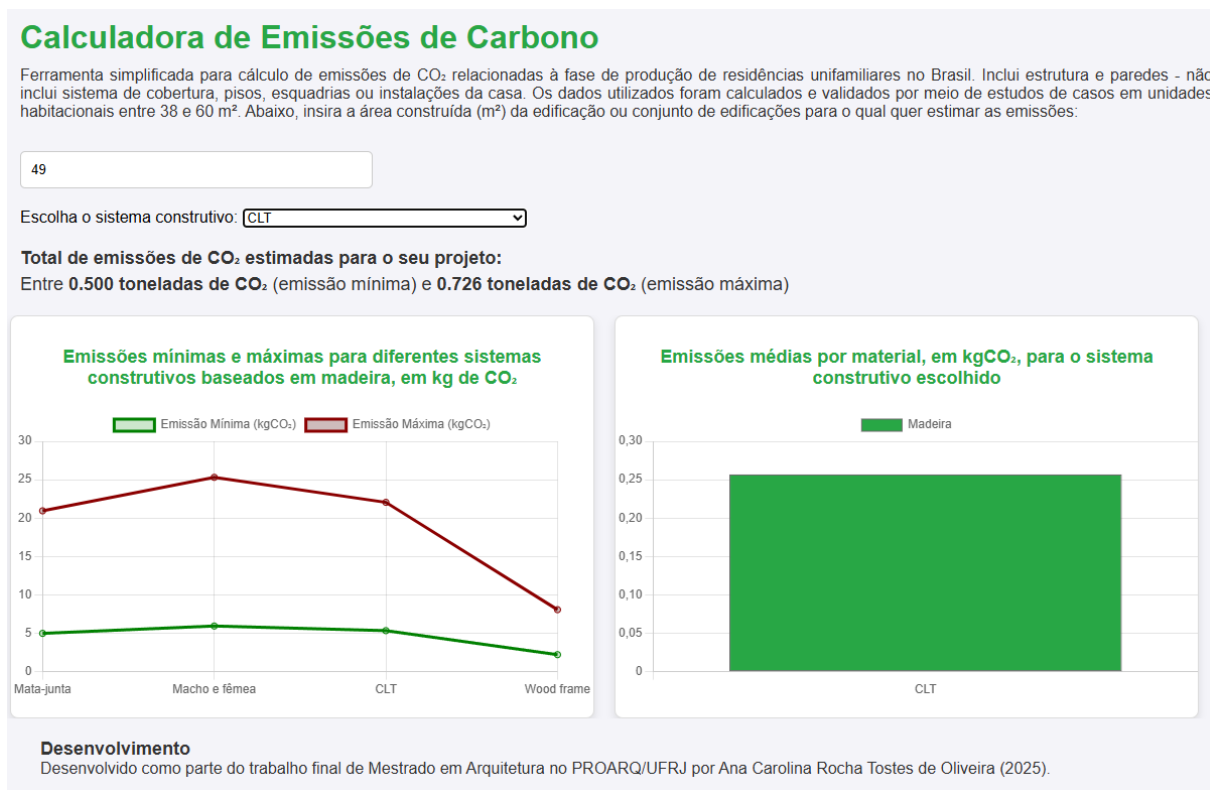
Figura 23 – Imagem extraída da ferramenta Calculadora de Emissões de Carbono (ferramenta-simplificada.vercel.app). Exemplo de aplicação da ferramenta para uma edificação de 50,22 m² adotando o sistema S2 (Alvenaria estrutural com blocos de concreto).



Fonte: Autoria própria.

Em contrapartida, nos sistemas baseados em madeira, o elemento (4) compara as emissões mínimas e máximas do sistema construtivo selecionado com os demais. A Figura 24 mostra um exemplo para uma unidade habitacional de 49 m² no sistema S5.

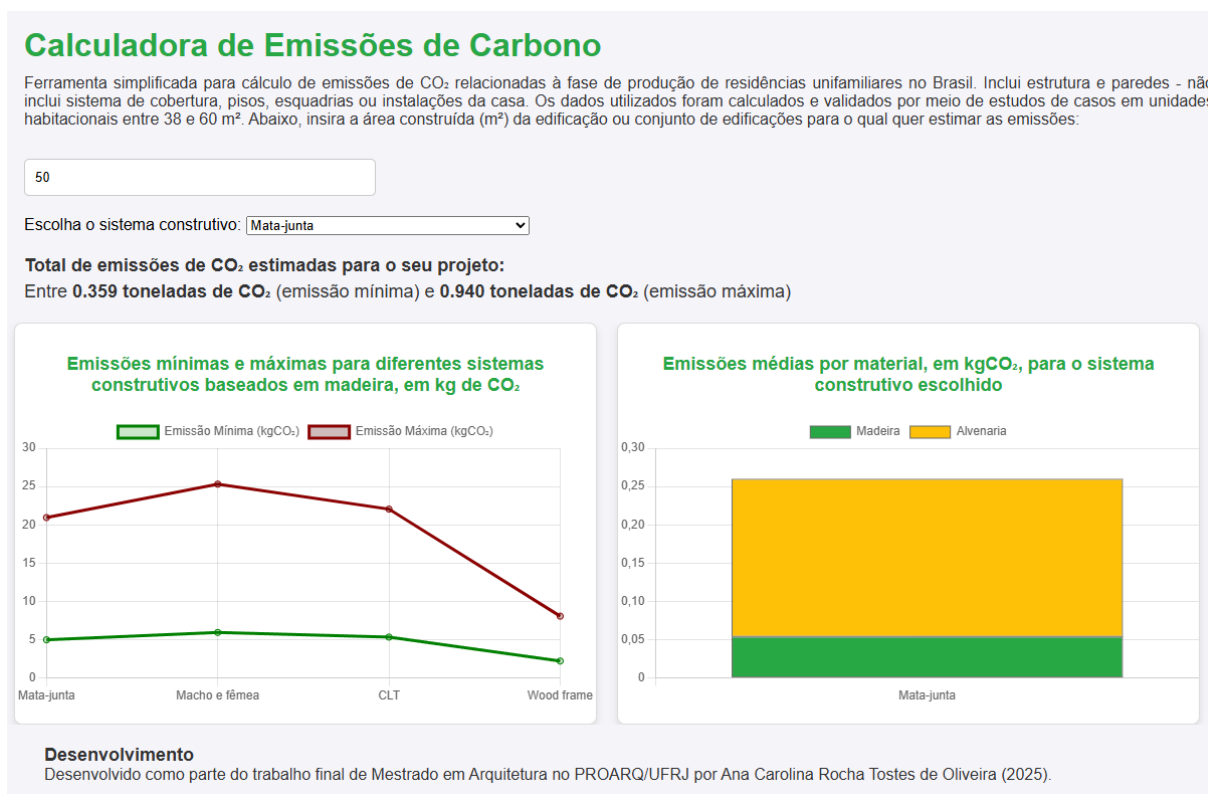
Figura 24 – Imagem extraída da ferramenta Calculadora de Emissões de Carbono (ferramenta-simplificada.vercel.app). Exemplo de aplicação da ferramenta para uma edificação de 49 m² adotando o sistema S5 (CLT).



Fonte: Autoria própria.

Em todos os casos, os elementos (3) e (5) se mantêm iguais. Enquanto (3) sempre mostra os valores mínimos e máximos de emissão de CO₂ para os dados de entrada inseridos (em toneladas de CO₂), o segundo é sempre um gráfico de barras que mostra as emissões médias por material (em kgCO₂) por metro quadrado construído. Nota-se que, para os casos em madeira mata-junta e macho e fêmea (S3 e S4), os materiais exibidos no elemento (5) foram divididos em dois grupos: madeira e alvenaria. Um exemplo de resultados obtidos pela ferramenta para uma casa de 50 m² em S3 pode ser visto na Figura 25.

Figura 25 – Imagem extraída da ferramenta Calculadora de Emissões de Carbono (ferramenta-simplificada.vercel.app). Exemplo de aplicação da ferramenta para uma edificação de 50 m² adotando o sistema S3 (mata-junta).



Fonte: Autoria própria.

Para demonstrar como comparações entre sistemas construtivos pode ser feita utilizando a ferramenta simplificada, foi feita uma análise do empreendimento Vivenda dos Girassóis, construído em 2012 em Itaguaí, Rio de Janeiro, por meio da ferramenta simplificada. O empreendimento conta com 411 unidades habitacionais, sendo 399 unidades de 39,54 m² e 12 de 52,91 m², totalizando uma área construída de 16.411,38 m². Considerando a metodologia adotada para a criação dos indicadores nesse trabalho, bem como todas as suas limitações, foi feita uma comparação das estimativas para essa área construída nos sistemas S1 (concreto armado com vedação em blocos cerâmicos), S2 (alvenaria estrutural com blocos de concreto) e S6 (*wood frame*).

A seguir, as Figura 26, 27 e Figura 28 mostram os resultados obtidos pela simulação do caso Vivenda dos Girassóis na ferramenta simplificada, com as

estimativas de emissão de CO₂ para os cenários de uso dos sistemas construtivos S1, S2 e S5. Depois, a Tabela 26 resume os resultados encontrados pela ferramenta, e indica em vermelho a diferença entre as emissões de S1 e S2 quando comparadas ao CLT, sistema construtivo em madeira que atende aos requisitos das normas brasileiras com os menores indicadores de emissões dentre os estudados nesta dissertação. Os dados mostram que o potencial de redução de emissões pelo sistema em CLT é de 315% em relação ao S1 e 170% em relação ao S2, considerando valores médios.

Figura 26 – Imagem extraída da ferramenta Calculadora de Emissões de Carbono (ferramenta-simplificada.vercel.app). Aplicação da ferramenta no caso Vivenda dos Girassóis, em sistema S1.

Calculadora de Emissões de Carbono

Ferramenta simplificada para cálculo de emissões de CO₂ relacionadas à fase de produção de residências unifamiliares no Brasil. Inclui estrutura e paredes - não inclui sistema de cobertura, pisos, esquadrias ou instalações da casa. Os dados utilizados foram calculados e validados por meio de estudos de casos em unidades habitacionais entre 38 e 60 m². Abaixo, insira a área construída (m²) da edificação ou conjunto de edificações para o qual quer estimar as emissões:

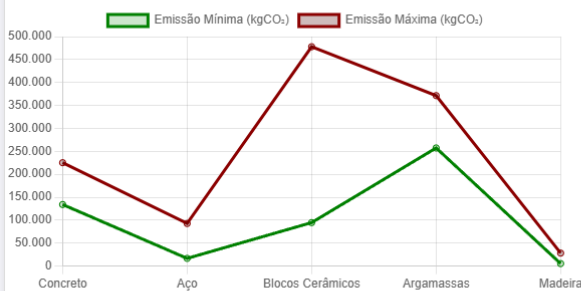
16411,38

Escolha o sistema construtivo: Concreto armado com vedação cerâmica

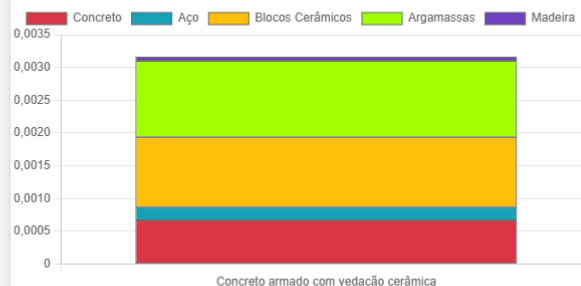
Total de emissões de CO₂ estimadas para o seu projeto:

Entre **508.260 toneladas de CO₂** (emissão mínima) e **1195.405 toneladas de CO₂** (emissão máxima)

Emissões mínimas e máximas por material, em kg de CO₂



Emissões médias por material, em kgCO₂, para o sistema construtivo escolhido



Desenvolvimento

Desenvolvido como parte do trabalho final de Mestrado em Arquitetura no PROARQ/UFRJ por Ana Carolina Rocha Tostes de Oliveira (2025).

Fonte: Autoria própria.

Figura 27 – Imagem extraída da ferramenta Calculadora de Emissões de Carbono (ferramenta-simplificada.vercel.app). Aplicação da ferramenta no caso Vivenda dos Girassóis, em sistema S2.

Calculadora de Emissões de Carbono

Ferramenta simplificada para cálculo de emissões de CO₂ relacionadas à fase de produção de residências unifamiliares no Brasil. Inclui estrutura e paredes - não inclui sistema de cobertura, pisos, esquadrias ou instalações da casa. Os dados utilizados foram calculados e validados por meio de estudos de casos em unidades habitacionais entre 38 e 60 m². Abaixo, insira a área construída (m²) da edificação ou conjunto de edificações para o qual quer estimar as emissões:

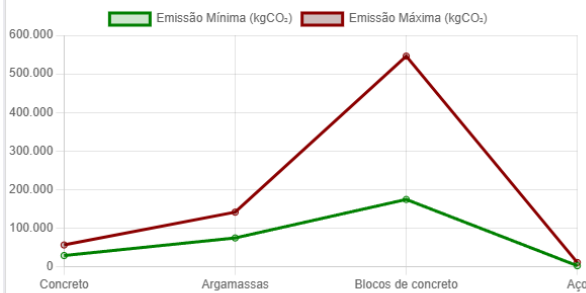
16411,38

Escolha o sistema construtivo: Alvenaria estrutural com blocos de concreto

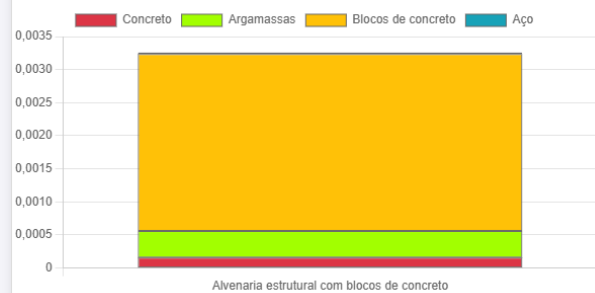
Total de emissões de CO₂ estimadas para o seu projeto:

Entre 280.963 toneladas de CO₂ (emissão mínima) e 827.626 toneladas de CO₂ (emissão máxima)

Emissões mínimas e máximas por material, em kg de CO₂



Emissões médias por material, em kgCO₂, para o sistema construtivo escolhido

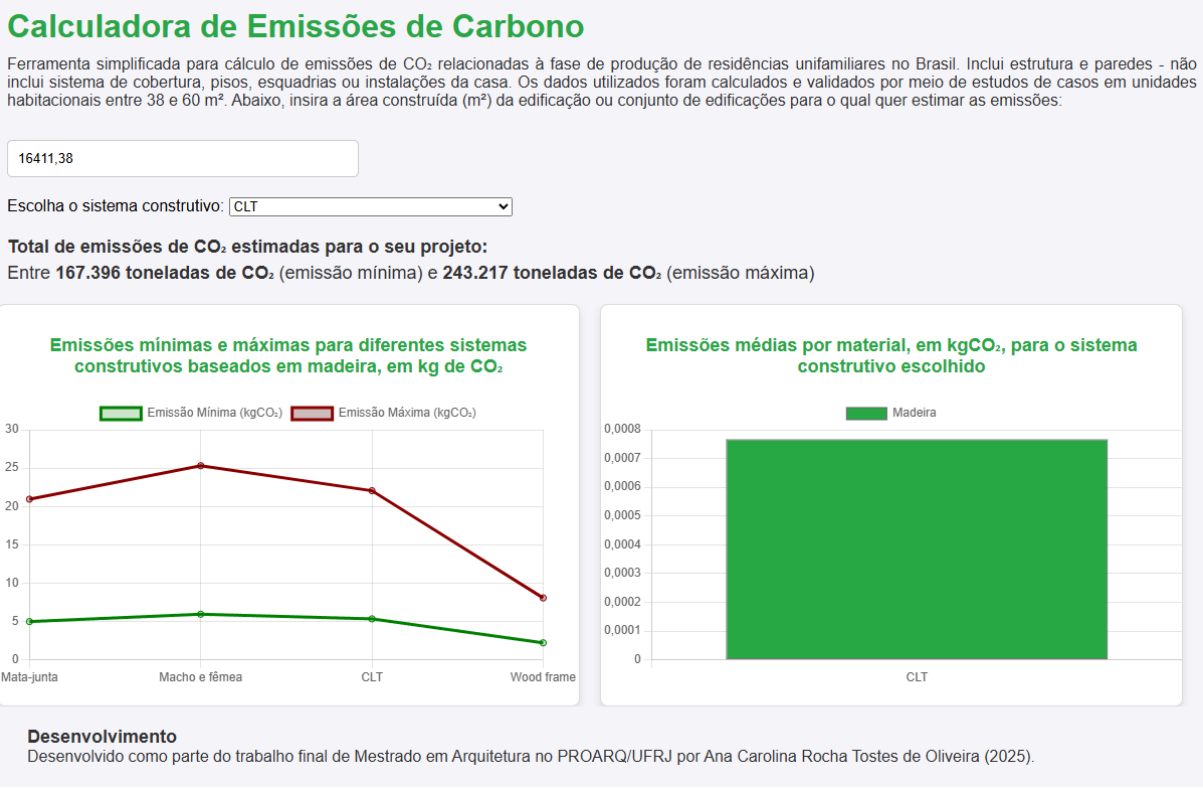


Desenvolvimento

Desenvolvido como parte do trabalho final de Mestrado em Arquitetura no PROARQ/UFRJ por Ana Carolina Rocha Tostes de Oliveira (2025).

Fonte: Autoria própria.

Figura 28 – Imagem extraída da ferramenta Calculadora de Emissões de Carbono ([ferramenta-simplificada.vercel.app](#)). Aplicação da ferramenta no caso Vivenda dos Girassóis, em sistema S5.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 26 – Emissões para o estudo de caso do Vivenda dos Girassóis, calculados pela ferramenta simplificada, em tonCO₂.

Sistema	Emissões do empreendimento, em toneladas de CO ₂	
	Mínimas	Máximas
S1	508,26 (+203%)	1195,41 (+392%)
S2	280,96 (+68%)	827,63 (+240%)
S6	167,39	243,22

Fonte: Autoria própria.

Referências do capítulo

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Mãos à obra**. São Paulo: ABCP, 32 p., 2010. Disponível em: https://cimento.org/wp-content/uploads/2010/06/M_OBRA.pdf. Acesso em: 21 jan. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12721**: Avaliação de custos unitários de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edifícios – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006. 91 p. Versão corrigida em janeiro de 2021.

BELIZARIO-SILVA, Fernanda; OLIVEIRA, Luciana Alves; JOHN, Vanderley Moacyr. Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: cimento. São Paulo: Sidac, 2022. Disponível em: https://sidac.org.br/documentos/Sidac_Cimento.pdf. Acesso em: 22 jan. 2025.

BERNI, Mauro Donizeti. Oportunidades de eficiência energética para a Indústria - Relatório setorial - Setor cerâmico. Brasília: CNI, 2010. Disponível em: https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/97/d5/97d55c18-e360-4e41-8b0f-db57aed2afe4/20121127140253106351i.pdf. Acesso em: 22 jan. 2025.

CAIXA Econômica Federal. **Cadernos CAIXA: Projeto padrão – casas populares**. Vitória: GIDUR/VT, 36 p., 2006. Disponível em: https://www.caixa.gov.br/Downloads/banco-projetos-projetos-HIS/casa_37m2.pdf. Acesso em: 21 jan. 2025.

CLETO, Fabiana da Rocha; VON MÜHLEN, João Felipe; BELIZARIO-SILVA, Fernanda. Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: blocos e telhas cerâmicos. São Paulo: SIDAC, 2022.

MARTINS, Karine Hilgenberg; PUNHAGUI, Katia Regina Garcia; JOHN, Vanderley Moacyr. Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: cal. São Paulo: Sidac, 2022.

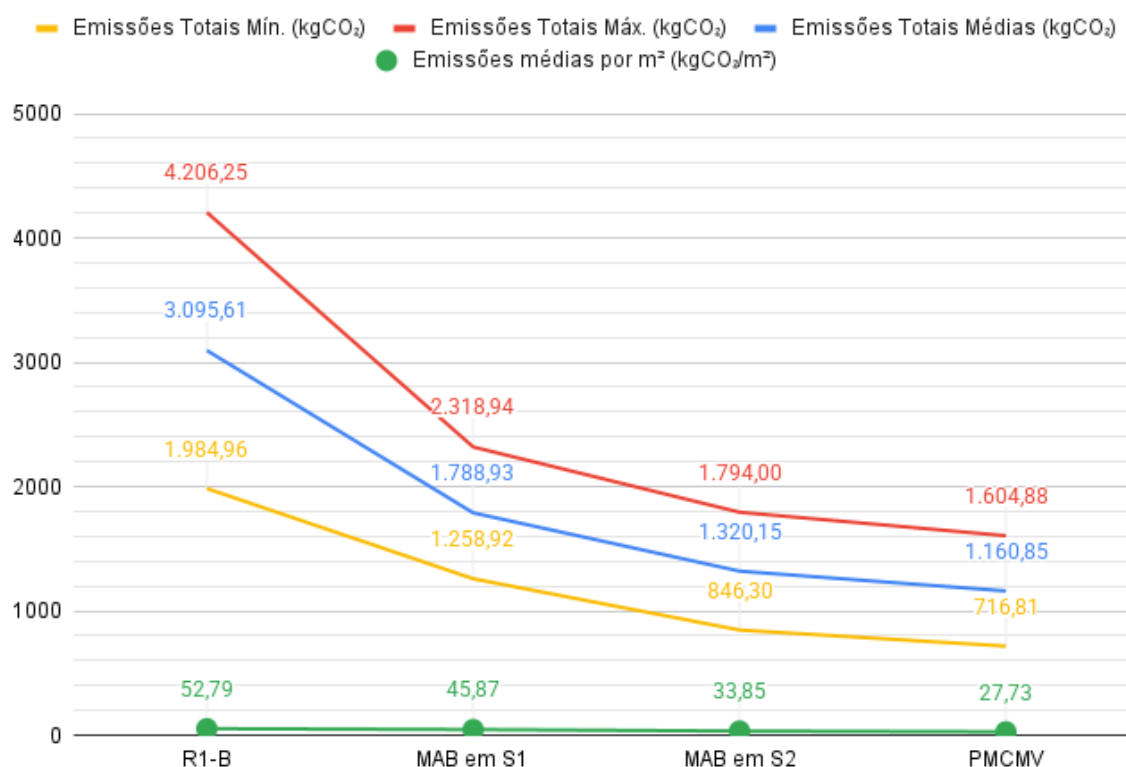
ORLANDINI, Luana Caroline; PUNHAGUI, Katia Regina Garcia. Strategies to reduce CO2 emissions and increase temporary carbon stock in Brazilian housing using planted wood. **Environmental Developmet**, v. 49, art. 100946, mar. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2023.100946>. Acesso em: 20 jan. 2025.

Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (Sidac). 2022.
Disponível em <https://Sidac.org.br/>.

DISCUSSÃO

Os estudos de caso conduzidos nesta pesquisa permitem determinar o consumo e as emissões de CO₂ por insumo em diferentes sistemas construtivos, incluindo sistemas baseados em alvenaria e sistemas baseados em madeira. Em relação aos modelos residenciais, a Figura 29 abaixo resume e compara os resultados encontrados no que diz respeito à quantificação de emissões de CO₂ das casas entre 39 m² e 59 m², aproximadamente, construídas em concreto armado com vedação em blocos cerâmicos (modelo R1-B e MAB) ou em alvenaria estrutural de blocos de concreto (modelos PMCMV e MAB).

Figura 29 – Emissões de CO₂ em modelos de casas brasileiras em sistemas baseados em alvenaria, totais e por metro quadrado construído.



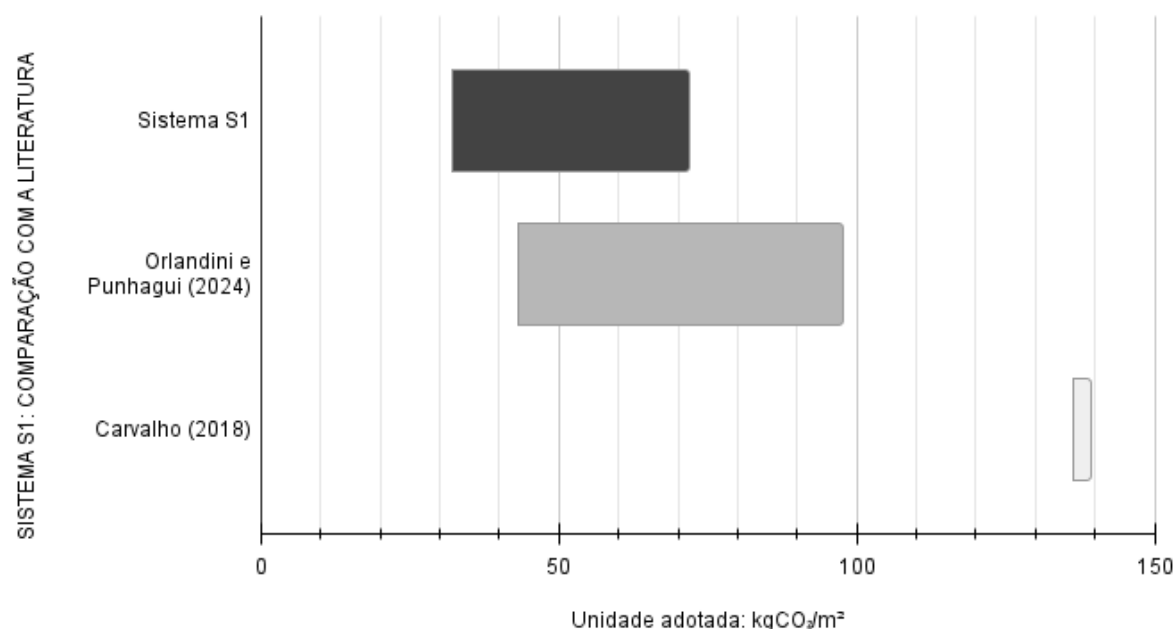
Fonte: Autoria própria.

No caso do R1-B, a variação entre emissões mínimas e máximas é mais evidente devido à adoção de valores mínimos e máximos para o consumo de materiais, além de, no geral, esse modelo apresentar maior consumo de concreto e de blocos cerâmicos que o MAB em S1 – ambos materiais com nível de emissões individuais já com alta variação. Além disso, o consumo de madeira para fôrmas, não existente nos modelos residenciais em alvenaria estrutural, e o maior consumo de aço, concreto e argamassas por metro quadrado construído, faz com que o sistema S1 tenha maior variação em relação ao S2.

Destaca-se que, no caso PMCMV, foi considerado o uso de concreto dosado em central, carregado no caminhão betoneira pronto para entrega, e não o concreto dosado em obra em traço 1:2:3, como nos outros modelos residenciais. Essa escolha contribuiu para que os níveis de emissões totais do PMCMV fossem menores, visto que os fatores de emissão para o concreto usinado são menores segundo o método adotado pelo Sidac (2022). Tanto para o PMCMV quanto para o MAB em S2, a maior parte da variação está relacionada aos blocos de concreto, devido à variação dos próprios indicadores do material (Sidac, 2022).

Para o caso da construção em concreto armado com vedação em blocos cerâmicos, exemplificado nesse trabalho pelo estudo de caso dos modelos R1-B e MAB, o indicador encontrado para as emissões por m² construído pode ser comparado com os encontrados por Orlandini e Punhagui (2024), que estudaram 30 plantas de modelos residenciais de área construída mediana de 45,2 m², e com os resultados de Carvalho (2018), que estudou um modelo residencial de 38,85 m². A comparação dos resultados pode ser vista na Figura 30, na qual a linha “R1-B” é referente aos achados do presente estudo.

Figura 30 – Emissões, em kgCO_2/m^2 construído, em casas de concreto armado com vedação em alvenaria cerâmica (sistema S1).



Fonte: Autoria própria.

Destaca-se que os níveis de emissões apresentados por Carvalho (2018) incluem as fases A4 e A5 do ciclo de vida, enquanto o presente estudo considera apenas até a fase A3. Além disso, o maior nível de emissões nesse estudo pode ter relação com o fato de Carvalho (2018) ter utilizado fatores de emissão categorizados como “resto do mundo” (*RoW*) no Ecoinvent, base de dados utilizada pelo *software* estrangeiro SimaPro – enquanto este estudo e o de Orlandini e Punhagui (2024) utilizaram somente dados brasileiros. No entanto, não é possível ter certeza sobre essa hipótese, sendo necessário em estudos futuros fazer uma análise mais aprofundada, utilizando o mesmo estudo de caso e os mesmos limites da ACV, para comparar os fatores de emissão de CO_2 genéricos de bases de dados internacionais e os fatores de emissão de CO_2 do Sidac. Já o trabalho de Orlandini e Punhagui (2024) apresenta resultados semelhantes para todos os insumos, no geral um pouco maiores que os

encontrados no presente estudo, com exceção das argamassas, conforme mostra a Tabela 27 abaixo.

Tabela 27 – Fatores de emissões de CO₂ para argamassas, em kgCO₂/m², para Orlandini e Punhagui (2024), em comparação com o presente trabalho.

Insumo	Emissão (kgCO ₂ /m ²) segundo Orlandini e Punhagui (2024)		Emissão (kgCO ₂ /m ²) no caso R1-B deste estudo	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx
Argamassa	7,24	7,37	15,68	22,63

Fonte: Aatoria própria, com dados de Orlandini e Punhagui (2024).

Por outro lado, nos modelos construídos em alvenaria estrutural, nota-se uma diferença da ordem de 5 kgCO₂ entre as emissões médias por metro quadrado do modelo PMCMV (27,73 kgCO₂) e do MAB (33,85 kgCO₂). Neste sentido, foram consultados os trabalhos de Costa (2012) e de Carvalho (2012) a fim de comparar os resultados e identificar os pontos que podem influenciar na variabilidade da estimativa de emissões de CO₂ para esse tipo de sistema construtivo.

Costa (2012) fez um estudo de caso no mesmo modelo residencial PMCMV que foi apresentado nessa dissertação, mas sua análise diferiu do presente estudo em termos de escopo, já que o autor incluiu as fases A4 e A5 do ciclo de vida em sua análise, além de ter incluído insumos para outras partes da edificação que não foram contabilizados no presente estudo – nomeadamente, os utilizados para fundações, pisos, cobertura, esquadrias, instalações elétricas, hidráulicas e sanitárias, além de vidros. Entretanto, se considerarmos as mesmas limitações da ACV consideradas para esta dissertação, os resultados de Costa (2012) apontariam para um total de 2890 kgCO₂ para a unidade habitacional PMCMV de 41,87 m², ou seja, aproximadamente 69 kgCO₂/m². Esse valor está acima do previsto pelos indicadores do sistema S2 na Tabela 25 (entre 17,12 e 50,43 kgCO₂/m²), o que pode ser explicado pelos fatores de emissão de CO₂ por kg de material adotados pelo

autor, em geral maiores do que os fatores de emissão do Sidac (adotados nessa dissertação), conforme mostra a Tabela 28 abaixo.

Tabela 28 – Fatores de emissões de CO₂ por insumo, para Costa (2012) e para este estudo com base no Sidac (2022).

Insumo	Emissão segundo Costa (2012)	Emissão segundo o Sidac		Unidade
		Mínima	Máxima	
Concreto	358	168,8	283,5	kgCO ₂ /m ³
Aço	1,8452	0,426	1,061	kgCO ₂ /kg
Blocos de concreto	0,184	0,033	0,091	kgCO ₂ /kg
Argamassa de assentamento	0,142	0,126	0,154	kgCO ₂ /kg

Fonte: Adaptado de Costa (2012) e Sidac.

De forma semelhante, os resultados de Carvalho (2018) para emissões de CO₂ associadas a uma unidade habitacional de 38,85 m² do PMCMV em alvenaria estrutural podem ser comparados aos resultados encontrados para o caso MAB, apresentados em 4.3. A autora encontrou valores entre 3526,15 kgCO₂ e 3583,77 kgCO₂ para uma unidade habitacional, ou seja, entre 90,76 e 92,25 kgCO₂/m² - valores significativamente acima do previsto na Tabela 25 para esse sistema. Destaca-se novamente que a autora utilizou dados internacionais do banco de dados Ecoinvent, versão 3.3, e calculou as emissões no SimaPro usando métodos internacionais de ACV. Adicionalmente, ressalta-se que a análise de Carvalho (2018) também considerou as fases A4 e A5 do ciclo de vida, para os seguintes insumos: blocos de concreto, argamassa de assentamento, graute, aço CA-50, areia, brita, cal hidratada e cimento. Logo, presume-se que as emissões de CO₂ equivalentes ao método adotado no presente estudo, que só considera as fases A1-A3 do ciclo de vida, seriam menores. Além disso, Carvalho (2018) e Costa (2012) adotaram fatores de perda dos materiais, conforme mostra a Tabela 29.

Tabela 29 – Fatores de perda por insumo em Costa (2012) e Carvalho (2018).

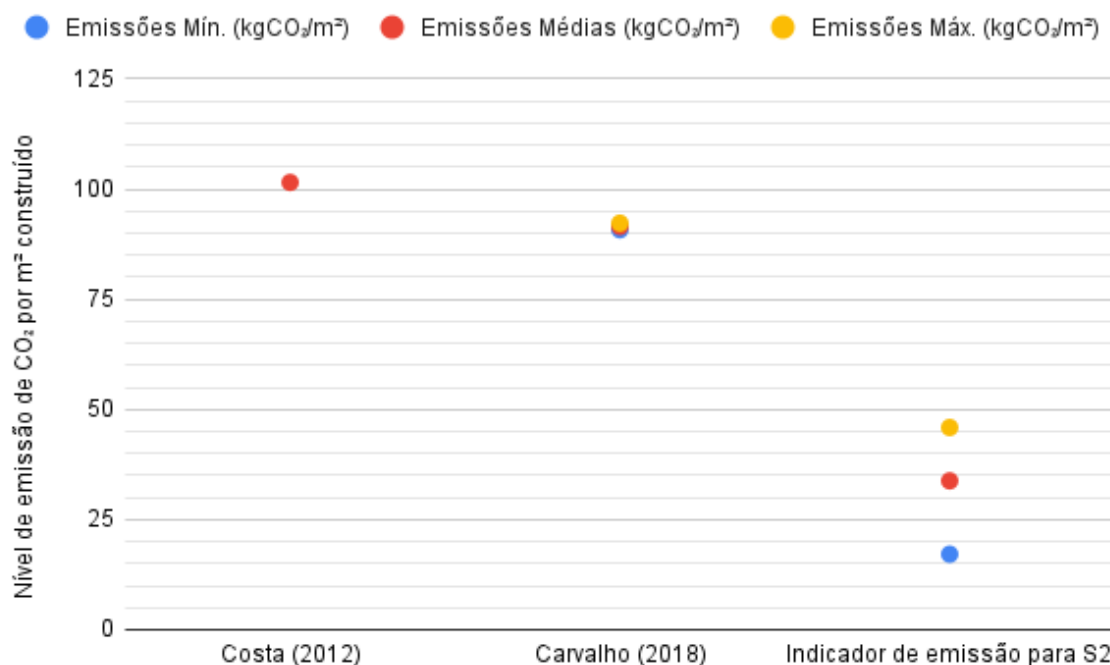
Insumos	Fator de perda em Carvalho (2018)	Fator de perda em Costa (2012), em média
Aço	5%	10%
Blocos cerâmicos	5%	17%
Blocos de concreto	3%	17%
Argamassas	30%	18%
Graute	30%	6%

Fonte: Adaptado de Costa (2012) e Carvalho (2018).

A comparação entre os estudos demonstra que o uso de dados nacionais na fase de inventário da ACV resulta em valores de emissão significativamente menores para edificações residenciais, pondo, portanto, em questionamento estimativas de impacto obtidas pelo uso de métodos e inventários internacionais de ACV.

Adicionalmente, considerando os limites da comparação entre os resultados dos diferentes autores, bem como as limitações do presente estudo que foram descritas em 3.1.3, a Figura 31 apresenta as emissões em unidades habitacionais unifamiliares em alvenaria estrutural, no Brasil, comparando o método adotado no presente estudo aos encontrados por Costa (2012) e Carvalho (2018).

Figura 31 – Níveis de emissão total, em kgCO_2/m^2 construído, para casas de alvenaria estrutural (por autor). A coluna “Indicador de emissão para S2” faz referência aos resultados deste trabalho, apresentados na Tabela 25.



Fonte: Autoria própria, com dados de Costa (2012) e Carvalho (2018).

Percebe-se que o maior nível de emissão de CO_2 encontrado neste estudo para o sistema de alvenaria estrutural com blocos de concreto (denominado S2) é equivalente à metade dos valores encontrados na literatura. De maneira geral, é possível dizer que os trabalhos realizados anteriormente tenham superestimado as emissões, e que os fatores de emissão de CO_2 por material do Sidac sejam mais confiáveis para estimativas dentro da realidade brasileira. Se Costa (2012) houvesse considerado o mesmo escopo deste trabalho, e os mesmos fatores de emissão (do Sidac), teria encontrado emissões médias de $32,09 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$, praticamente a mesma a mesma média encontrada para o caso MAB no sistema S2. Similarmente, se Carvalho (2018) tivesse considerado um fator de perda menor para grautes e argamassas, responsáveis por grande parte do impacto total de casas em alvenaria estrutural (conforme evidenciado em 4.2 e 4.3), teria encontrado um valor médio para emissões de CO_2 por m^2 inferior.

Além disso, em relação aos sistemas construtivos baseados em madeira, os resultados sugerem que:

- A estimativa de emissão de CO₂ nos sistemas mata-junta e macho e fêmea tem maior variação entre níveis máximos e mínimos do que os indicadores encontrados para sistemas baseados em alvenaria e sistemas *wood frame* e CLT;
- Dentre os sistemas construtivos considerados, o sistema em *wood frame* é o que apresenta menor nível de variação, e os sistemas mata-junta e macho e fêmea são os menos impactantes por metro quadrado construído;
- No sistema construtivo em CLT, os adesivos de poliuretano são responsáveis por cerca de 20% a 30% das emissões de CO₂;
- Para os sistemas construtivos em mata-junta e macho e fêmea, o uso de alvenaria em blocos de concreto nas áreas molhadas (banheiros, cozinhas e lavanderias) é responsável por cerca de 76% a 96% das emissões de CO₂ no sistema em mata-junta, e por cerca de 62% a 75% das emissões de CO₂ no sistema em macho e fêmea.

Referências do capítulo

CARVALHO, Tathiana do Nascimento. Diretrizes da avaliação do ciclo de vida aplicadas à tomada de decisões em projeto. 2018. 229 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <http://objdig.ufrj.br/21/teses/876275.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2025.

COSTA, Bruno Luis de Carvalho. Quantificações das Emissões de CO2 Geradas na Produção de Materiais Utilizados na Construção Civil no Brasil. 2012. 208 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/pt/dissertacoes-de-mestrado/112-msc-pt-2012/2251-bruno-luis-de-carvalho-da-costa>. Acesso em: 20 jan. 2025.

ORLANDINI, Luana Caroline; PUNHAGUI, Katia Regina Garcia. Strategies to reduce CO2 emissions and increase temporary carbon stock in Brazilian housing using planted wood. **Environmental Developmet**, v. 49, art. 100946, mar. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2023.100946>. Acesso em: 20 jan. 2025.

PRÉ SUSTAINABILITY. SimaPro: versão 9.1. Amsterdã: PRé Sustainability, [2025]. Disponível em: <https://simapro.com/>. Acesso em: 21 jan. 2025.

Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (Sidac). 2022. Disponível em <https://Sidac.org.br/>.

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

O presente trabalho propôs uma avaliação em relação às emissões de CO₂ de edificações residenciais unifamiliares no Brasil, com atenção particular à envoltória vertical, composta pela vedação e estrutura das paredes. Foi possível quantificar as emissões de CO₂ em diferentes cenários, incluindo sistemas construtivos hegemônicos, amplamente adotados para a construção de residências de padrão social, como as do Programa *Minha Casa, Minha Vida*, bem como soluções construtivas em madeira. Para atender aos objetivos específicos, foram desenvolvidos: (i) indicadores de emissão de CO₂ para os diferentes cenários abordados, utilizando dados brasileiros, e (ii) uma ferramenta de cálculo de emissões de carbono, que simplifica o processo dispendioso e complexo de estimativa de emissões de projeto ao depender de apenas dois dados de entrada acerca do projeto a ser avaliado – e que, deste modo, favorece a aproximação de estudantes de AEC e arquitetos leigos em ACV. Nesse contexto, as principais conclusões desta pesquisa estão destacadas a seguir.

Inicialmente, os resultados apresentados corroboram com a vasta literatura científica sobre o tema e relacionam os materiais cimentícios com um impacto global mais elevado na construção de uma edificação, em comparação com os outros tipos de material. No sistema construtivo em alvenaria estrutural, os blocos de concreto ocupam a posição de insumo mais impactante e são também os que tem os níveis de emissão mais variáveis. No caso da construção em concreto armado com fechamento cerâmico, as argamassas ocupam o lugar de material mais impactante, quando considerados os indicadores médios de emissão por metro quadrado construído. Os blocos cerâmicos, apesar de serem em média menos emitentes que os blocos de concreto, não compensam o impacto dos outros materiais no sistema S1, tornando esse o tipo de sistema construtivo mais impactante.

Em contrapartida, os sistemas baseados em madeira demonstraram um grande potencial de redução de impactos relacionados às emissões de CO₂ – no que diz respeito às fases do ciclo de vida relativas à construção –, comparado à construção hegemônica em alvenaria usualmente aplicada nos programas de habitação de interesse social. O sistema em madeira do tipo CLT é o com menor indicador de emissões dentre os sistemas que atendem os requisitos das normas brasileiras, embora o sistema em mata-junta possa ser ainda cinco vezes menos impactante.

Em relação ao contexto de digitalização crescente da arquitetura, e diante das dificuldades para aplicação da ACV relatada por profissionais, foi desenvolvida uma ferramenta digital simplificada, que facilita a aplicação dos indicadores de emissões propostos por este trabalho, e que podem ser utilizadas por estudantes da área de AEC e por arquitetos leigos em ACV. Um exemplo de aplicação da ferramenta foi apresentado em 4.6, mostrando os resultados deste trabalho tornam possível estimar as emissões de um grande empreendimento de forma rápida e simples.

A relevância da ferramenta proposta foi evidenciada pela RSL apresentada no Capítulo 2, que destacou que nos últimos anos têm sido feitos esforços para criar abordagens científicas novas com base na ACV que atendam cenários específicos – incluindo métodos de criação de indicadores e ferramentas digitais. Foi possível constatar que o uso de ACV no campo da arquitetura ganhou força na última década, em estudos que geralmente utilizavam *softwares* ou *plugins* para a estimativa de impactos ambientais. Além disso, a RSL mostrou que, mais recentemente, a tecnologia de Inteligência Artificial (IA) tem sido utilizada para criar cenários de ACV, possibilitando prever emissões para diferentes cenários, inclusive em escala urbana. Para isso, recomenda-se o uso indicadores como os apresentados neste trabalho para estimar projeções futuras de emissões de CO₂,

considerando a tendência ao aumento de construções residenciais nos próximos anos, de forma local ou nacional.

Para estudos futuros, recomenda-se a incorporação de outras fases do ciclo de vida nos indicadores de emissão de CO₂ por cenário, incluindo etapas de transporte, uso e operação – que podem mudar a relação entre consumo e emissões evidenciada no capítulo de Discussão. Da mesma forma, recomenda-se a avaliação do potencial de reuso e reciclagem de materiais, especialmente os cimentícios, por meio de uma ACV que inclua as fases de fim de vida, bem como a avaliação das emissões incorporadas de outros aspectos mais variáveis em projetos, como o sistema de cobertura, esquadrias e instalações, que não foram considerados nesta dissertação.

A partir das recomendações feitas neste capítulo, será possível em trabalhos futuros estimar indicadores de emissão de CO₂ ainda mais certos, potencialmente ampliando o escopo da ferramenta simplificada que foi apresentada nesta pesquisa. Deste modo, será possível atender a uma gama mais ampla de possibilidades de avaliação por meio de indicadores e de modelos de cálculo mais robustos.

APÊNDICE A

Código .js:

```
import React, { useState, useEffect } from 'react';
import { Line, Bar } from 'react-chartjs-2';
import {
  Chart as ChartJS,
  CategoryScale,
  LinearScale,
  PointElement,
  LineElement,
  BarElement,
  Title,
  Tooltip,
  Legend,
} from 'chart.js';
import './App.css';

// Registrar os componentes do Chart.js
ChartJS.register(
  CategoryScale,
  LinearScale,
  PointElement,
  LineElement,
  BarElement,
  Title,
  Tooltip,
  Legend
);

function App() {
  const [area, setArea] = useState(0);
  const [emissoes, setEmissoes] = useState([]);
```

```
const [emissaoTotal, setEmissaoTotal] = useState({ min: 0, med: 0, max: 0 });
const [sistemaConstrutivo, setSistemaConstrutivo] = useState("S1"); // Estado para
controle do sistema construtivo
```

```
// Materiais e suas emissões mínimas e máximas por m²
const sistemasConstrutivos = {
  S1: {
    nome: "Concreto armado com vedação cerâmica",
    materiais: [
      { nome: "Concreto", min: 8.17, med: 10.945, max: 13.72, cor: "#dc3545" },
      { nome: "Aço", min: 1.02, med: 3.35, max: 5.65, cor: "#17a2b8" },
      { nome: "Blocos Cerâmicos", min: 5.77, med: 17.45, max: 29.12, cor: "#ffc107"
    },

    { nome: "Argamassas", min: 15.68, med: 19.15, max: 22.63, cor: "#a2ff00" },
    { nome: "Madeira", min: 0.33, med: 1.025, max: 1.72, cor: "#6f42c1" }
  ]
},

  S2: {
    nome: "Alvenaria estrutural com blocos de concreto",
    materiais: [
      { nome: "Concreto", min: 1.77, med: 2.605, max: 3.44, cor: "#dc3545" },
      { nome: "Argamassas", min: 4.55, med: 6.585, max: 8.62, cor: "#a2ff00" },
      { nome: "Blocos de concreto", min: 10.63, med: 43.89, max: 33.26, cor: "#ffc107"
    },

    { nome: "Aço", min: 0.16, med: 0.415, max: 0.67, cor: "#17a2b8" },
  ]
},

  S3: {
    nome: "Mata-junta",
    materiais: [
      { nome: "Madeira", min: 1, med: 2.695, max: 4.39, cor: "#28a745" },
      { nome: "Alvenaria", min: 6.19, med: 10.3, max: 14.41, cor: "#ffc107" }
    ]
  },
}
```



```

S4: {
  nome: "Macho e fêmea",
  materiais: [
    { nome: "Madeira", min: 2.05, med: 5.37, max: 8.69, cor: "#28a745" },
    { nome: "Alvenaria", min: 6.19, med: 10.3, max: 14.41, cor: "#ffc107" }
  ]
},
S5: {
  nome: "CLT",
  materiais: [
    { nome: "Madeira", min: 10.2, med: 12.58, max: 14.82, cor: "#28a745" },
  ]
},
S6: {
  nome: "Wood frame",
  materiais: [
    { nome: "Madeira", min: 18.57, med: 19.27, max: 19.98, cor: "#28a745" },
  ]
},
};

```

```
const materiais = sistemasConstrutivos[sistemaConstrutivo].materiais;
```

```
// Função para calcular as emissões
```

```
const calcularEmissoes = () => {
```

```
  let emissoesMin = 0;
```

```
  let emissoesMax = 0;
```

```
  const emissoesPorMaterial = materiais.map((material) => {
```

```
    const emissaoMin = material.min * area;
```

```
    const emissaoMax = material.max * area;
```

```

    emissoesMin += emissaoMin;
    emissoesMax += emissaoMax;

    return {
        nome: material.nome,
        min: emissaoMin,
        max: emissaoMax,
        media: ((emissaoMin + emissaoMax) / 2), // Média das emissões
        cor: material.cor
    };
});

// ♦ Exceção para S2 (Alvenaria Estrutural com Blocos de Concreto)
if (sistemaConstrutivo === "S2") {
    emissoesMin = 17.12 * area;
    emissoesMax = 50.43 * area;
}

setEmissoes(emissoesPorMaterial);
setEmissaoTotal({ min: emissoesMin, max: emissoesMax });
};

// Configuração dos dados para o gráfico de linha
let labels = [];
let dadosMin = [];
let dadosMax = [];

if ([ "S3", "S4", "S5", "S6" ].includes(String(sistemaConstrutivo))) {
    // Se for Madeira Plantada, separar os sistemas corretamente
    const materiaisSeparados = [
        { nome: "Mata-junta", min: 4.983, max: 20.944 },
        { nome: "Macho e fêmea", min: 5.943, max: 25.308 },
        { nome: "CLT", min: 5.34, max: 22.05 },
    ];
}

```

```

    { nome: "Wood frame", min: 2.21, max: 8.07},
  ];

  materiaisSeparados.forEach((material) => {
    labels.push(material.nome);
    dadosMin.push(material.min.toFixed(3));
    dadosMax.push(material.max.toFixed(3));
  });

} else if (["S7", "S8"].includes(String(sistemaConstrutivo))) {
  // Se for Madeira Nativa, apenas os sistemas CLT e Wood Frame
  const materiaisSeparados = [
    { nome: "CLT", min: 714.33, max: 9422.89 },
    { nome: "Wood frame", min: 293.74, max: 3437.75 },
  ];

  materiaisSeparados.forEach((material) => {
    labels.push(material.nome);
    dadosMin.push(material.min.toFixed(3));
    dadosMax.push(material.max.toFixed(3));
  });

} else {
  // Para os sistemas tradicionais, S1 e S2, usar os dados normais
  labels = materiais.map(material => material.nome);
  dadosMin = emissoes.map((emissao) => (emissao.min).toFixed(3));
  dadosMax = emissoes.map((emissao) => (emissao.max).toFixed(3));
}

// Criar os datasets com os novos dados organizados
const chartDataLine = {
  labels: labels,
  datasets: [
    {

```

```

    label: 'Emissão Mínima (kgCO2)',
    data: dadosMin,
    borderColor: 'green',
    backgroundColor: 'rgba(0, 128, 0, 0.2)',
    fill: true,
  },
  {
    label: 'Emissão Máxima (kgCO2)',
    data: dadosMax,
    borderColor: 'darkred',
    backgroundColor: 'rgba(75, 5, 5, 0.27)',
    fill: true,
  },
],
};

```

// Configuração dos dados para o gráfico de barras empilhadas

```

const chartDataBar = {
  labels: [sistemasConstrutivos[sistemaConstrutivo].nome], // Nome do sistema
  construtivo
  datasets: materiais.map((material) => {
    const mediaEmissaoPorM2 = area > 0 ? (material.med) / area : 0; // Média por
    m²

    return {
      label: material.nome,
      data: [mediaEmissaoPorM2],
      backgroundColor: material.cor,
      borderColor: "#666666",
      borderWidth: 1,
      stack: 'stack1', // Certifique-se de que todas as barras pertencem à mesma
      pilha

      borderSkipped: false // Garantir que a borda da barra apareça na parte inferior
    };
  }),
};

```

```
};
```

```
useEffect(() => {
```

```
    calcularEmissoes(); // Atualiza as emissões sempre que o sistema construtivo ou
    área mudarem
```

```
    }, [sistemaConstrutivo, area]
```

```
});
```

```
return (
```

```
    <div className="App">
```

```
        <h1>Calculadora de Emissões de Carbono</h1>
```

```
        <p class="subtitulo">Ferramenta simplificada para cálculo de emissões de CO2
        relacionadas à fase de produção de residências unifamiliares no Brasil. Inclui estrutura e
        paredes - não inclui sistema de cobertura, pisos, esquadrias ou instalações da casa. Os
        dados utilizados foram calculados e validados por meio de estudos de casos em unidades
        habitacionais entre 38 e 60 m². Abaixo, insira a área construída (m²) da edificação ou
        conjunto de edificações para o qual quer estimar as emissões:</p>
```

```
        <input
```

```
            type="number"
```

```
            value={area}
```

```
            onChange={(e) => setArea(e.target.value)}
```

```
            placeholder="Área do projeto (m²)"
```

```
            className="input-area"
```

```
        />
```

```
        { /* Seletor de sistema construtivo */ }
```

```
        <div className="sistema-selector">
```

```
            <label htmlFor="sistema-construtivo">Escolha o sistema construtivo: </label>
```

```
            <select
```

```
                id="sistema-construtivo"
```

```
                value={sistemaConstrutivo}
```

```
                onChange={(e) => setSistemaConstrutivo(e.target.value)}
```

```

>
{Object.entries(sistemasConstrutivos).map(([key, sistema]) => (
  <option key={key} value={key}>
    {sistema.nome}
  </option>
))}
</select>

</div>

<div className="total-emissoes">
  <h4>Total de emissões de CO2 estimadas para o seu projeto:</h4>
  <p>
    Entre <span>{(emissaoTotal.min / 1000).toFixed(3)} toneladas de CO2</span>
    (emissão mínima) e <span>{(emissaoTotal.max / 1000).toFixed(3)} toneladas de CO2
    </span> (emissão máxima)
  </p>
</div>

  {/* Exibindo os gráficos */}
  {emissoes.length > 0 && (
    <div className="grafico-container">
      <div className="grafico">
        {materiais.length > 0 ? (
          // Se houver mais de um material, exibe o gráfico de linha normalmente
          <>
            <h3>
              {"S1", "S2"}.includes(sistemaConstrutivo)
                ? "Emissões mínimas e máximas por material, em kg de CO2"
                : ["S3", "S4", "S5", "S6"].includes(sistemaConstrutivo)
                  ? "Emissões mínimas e máximas para diferentes sistemas construtivos baseados
em madeira, em kg de CO2"
                  : ["S7", "S8"].includes(sistemaConstrutivo)
                }
            }
          )
        }
      </div>
    </div>
  )}

```

```

</h3>
    <Line data={chartDataLine} options={{ responsive: true, maintainAspectRatio:
true }} />
    </>
    ): (
    <>

</>
    )}
</div>

{ /* Gráfico de barras empilhadas continua sempre aparecendo */}
<div className="grafico">
    <h3>Emissões médias por material, em kgCO2, para o sistema construtivo
escolhido</h3>
    <Bar
    data={chartDataBar}
    options={{
    responsive: true,
    maintainAspectRatio: true,
    plugins: {
    tooltip: {
    callbacks: {
    label: function (context) {
    const value = context.raw;
    return ` ${context.dataset.label}: ${value.toFixed(3)} kgCO2`;

    },
    },
    },
    },
    scales: {
    y: { stacked: true },
    x: { stacked: true },

```

```

    },
  }}
  />
</div>
</div>
)}

<div class="final-text">
  <h2>Desenvolvimento</h2>
  <p>Desenvolvido como parte do trabalho final de Mestrado em Arquitetura no
PROARQ/UFRJ por Ana Carolina Rocha Tostes de Oliveira (2025).</p>
</div>
</div>
);
}

export default App;

```

Código .css:

```

/* Estilo para o corpo e o título */
body {
  font-family: Arial, sans-serif;
  display: flex;
  flex-direction: column;
  align-items: center;
  justify-content: flex-start; /* Alterado para que o conteúdo não fique centralizado
verticalmente */
  margin: 0;
  min-height: 100vh; /* Altura mínima */
  margin: 0;
  background-color: #f4f4f9;
  overflow-x: hidden; /* Evitar rolagem horizontal */
}

```



```
* {  
  box-sizing: border-box;  
  margin: 0;  
  padding: 0;  
}
```

```
h1 {  
  color: #28a745; /* Verde */  
  font-size: 32px;  
  margin-bottom: 10px;  
  margin-top: 20px;  
  margin-left: 20px;  
  text-align: left;  
}
```

```
/* Estilo para o subtítulo */  
.subtitulo {  
  font-size: 16px;  
  color: #333;  
  text-align: justify; /* Alinha o texto à esquerda */  
  margin-top: 10px; /* Espaço entre o título e o novo texto */  
  margin-bottom: 20px; /* Espaço entre o novo texto e o input */  
  margin-left: 20px;  
  margin-right: 10px;  
}
```

```
/* Estilo para o input de área */  
.input-area {  
  padding: 10px;  
  margin-right: 10px;  
  border-radius: 5px;  
  border: 1px solid #ccc;
```

```
margin-top: 10px;
margin-bottom: 20px;
margin-left: 20px;
width: 100%;
max-width: 350px; /* Tamanho máximo para inputs */
}

.sistema-selector {
margin-left: 20px;
}

/* Estilo para o botão */
button {
padding: 10px 20px;
background-color: #28a745;
color: white;
border: none;
border-radius: 5px;
cursor: pointer;
margin-top: 10px;
margin-left: 20px;
}

button:hover {
background-color: #218838;
}

/* Estilo para a área que exibe as emissões */
.total-emissoes {
margin-top: 20px;
font-size: 18px;
color: #333;
margin-left: 20px;
}
```

```
.total-emissoes p {  
  margin: 5px 0;  
}
```

```
.total-emissoes span {  
  font-weight: bold;  
}
```

```
/* Estilo para a área dos gráficos */
```

```
.grafico-container {  
  display: flex;  
  justify-content: space-between;  
  gap: 20px;  
  margin-top: 20px;  
  width: 100%;  
  max-width: 1200px;  
  padding: 0 10px;  
  flex-wrap: wrap;  
  overflow-x: auto; /* Habilitar rolagem horizontal apenas se necessário, como em celulares */  
}
```

```
/* Estilo para cada gráfico */
```

```
.grafico {  
  flex: 1 1 calc(50% - 20px);  
  height: 400px;  
  min-width: 300px;  
  background-color: white;  
  border: 1px solid #ddd;  
  border-radius: 8px;  
  box-shadow: 0 4px 8px rgba(0, 0, 0, 0.1);  
}
```

```
/* Títulos dos gráficos */
.grafico h3 {
  font-size: 18px;
  color: #28a745; /* Verde */
  text-align: center;
  margin-bottom: 20px;
  margin-top: 30px;
}

/* Texto explicativo das barras */
.barra-info {
  margin-top: 20px;
  font-size: 16px;
  text-align: center;
  color: #333;
}

/* Adicionando media query para responsividade */
@media (max-width: 768px) {
  .grafico-container {
    flex-direction: column;
    align-items: center;
    padding: 0 5px;
  }

  .grafico {
    width: 100%;
    margin-bottom: 20px; /* Espaço entre os gráficos */
  }

  /* Ajustando o tamanho do título */
  h1 {
    font-size: 28px;
  }
}
```

```
/* Ajustando o tamanho do input */
.input-area {
    max-width: 90%;
}

/* Ajustando o tamanho do botão */
button {
    width: 100%;
}

}

@media (max-width: 480px) {
    /* Ajuste de font-size para telas menores */
    h1 {
        font-size: 24px;
    }

    .total-emissoes {
        font-size: 16px;
    }

    .grafico h3 {
        font-size: 16px;
    }

    .grafico {
        height: 350px; /* Diminuir altura em telas menores */
    }

    /* Estilo para o texto no final da página */

}

.final-text {
```

```
margin-top: 20px; /* Adiciona um espaço entre os gráficos e o novo texto */
text-align: left; /* Alinha o texto ao centro */
margin-left: 20px !important;
}

.final-text h2 {
  font-size: 18px;
  color: #333; /* Cor do texto */
  margin-left: 20px !important;
}

.final-text p {
  font-size: 16px;
  color: #333; /* Cor do texto */
  margin-left: 20px !important;
  margin-bottom: 20px;
}
}"
```