

INDICADORES DE EMISSÃO DE CO₂ NA CONSTRUÇÃO DE HABITAÇÃO SOCIAL NO BRASIL EM SISTEMAS CONSTRUTIVOS BASEADOS EM ALVENARIA E EM MADEIRA

CO₂ EMISSIONS INDICATORS FOR BRAZILIAN SOCIAL HOUSING CONSTRUCTION IN MASONRY AND WOOD-BASED CONSTRUCTION SYSTEMS

Ana Carolina Rocha Tostes de Oliveira ¹; Thiago Melo Grabois ².

¹Mestre em Arquitetura | ana.tostes@fau.ufrj.br | UFRJ | Rio de Janeiro, Brasil; ²Doutor em Engenharia Civil | grabois@fau.ufrj.br | UFRJ | Rio de Janeiro, Brasil.

Resumo:

Diante do potencial de descarbonização na arquitetura, este trabalho teve como objetivo estimar as emissões de CO₂ incorporado em modelos residenciais de padrão social no Brasil. Foi utilizada a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), no escopo da fase de produção dos materiais (A1-A3), para simular o impacto da construção de casas nos sistemas: concreto armado com vedação cerâmica (S1), alvenaria estrutural com blocos de concreto (S2), *wood frame* (S3) e CLT (S4). Para isso, foram considerados fatores de emissão nacionais do Sidac e dados de consumo de materiais baseados em projetos-padrão, incluindo um modelo residencial do Minha Casa Minha Vida (MCMV), o modelo CUB R1-B, o modelo Mãos à Obra (MAB/ABCP), e outros modelos com sistema construtivo baseado em madeira selecionados da literatura. Os indicadores de emissão encontrados foram de 52,05 kgCO₂/m² no sistema S1, 31,5 kgCO₂/m² no sistema S2, 19,27 kgCO₂/m² no sistema S3 e 12,5 kgCO₂/m² no sistema S4, destacando o potencial dos sistemas baseados em madeira para a redução do impacto ambiental. Além disso, a comparação entre os sistemas oferece subsídios para decisões sustentáveis em etapas iniciais do projeto e pode contribuir para políticas públicas voltadas à descarbonização do setor habitacional brasileiro, especialmente no contexto de construção de habitação social.

Palavras-chave:

Avaliação do Ciclo de Vida (ACV); Emissão de CO₂; Indicadores de impacto ambiental; Habitação social.

Abstract:

Given the potential for decarbonization in architecture, this study aimed to estimate the embodied CO₂ emissions in standard social housing models in Brazil. A Life Cycle Assessment (LCA) was conducted, focusing on the production phase of materials (A1-A3), on single-story housing models that are widely replicated across the country. Different construction systems were studied, namely reinforced concrete structures (S1), structural masonry (S2), wood frame (S3) and CLT (S4). National emission factors from Sidac were considered along with material consumption data based on standard housing projects. For concrete-based systems, the residential models "Minha Casa Minha Vida" (MCMV), the CUB R1-B model, and the "Mãos à Obra" (MAB) model from ABCP were used. For the wood-based scenarios, models were selected based on recent literature. The resulting indicators were 52.05 kgCO₂/m² for system S1, 31.5 kgCO₂/m² for system S2, 19.27 kgCO₂/m² for system S3, and 12.5 kgCO₂/m² for system S4, highlighting the potential of wood-based systems in reducing environmental impact. Furthermore, the comparison between systems provides support for decision-making in the early stages of design and can contribute to public policies aimed at decarbonizing the Brazilian housing sector, especially in the context of social housing construction.

Keywords:

Life Cycle Assessment (LCA); CO₂ emission; Environmental impact indicators; Social housing.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima, as atividades humanas já causaram um aquecimento global em 1,09°C desde o período pré-industrial (IPCC, 2021), e é baixa a probabilidade de atingir a meta estabelecida no Acordo de Paris - manter o aquecimento global entre 1,5 e 2°C. Nesse cenário, a construção civil é responsável por aproximadamente 27% das emissões de gases de efeito estufa globais (UNEP, 2023) e é o setor que apresenta o maior potencial para economia de energia e redução de emissão de carbono (Kylili, Ilic, Fokaides, 2017), que são os dois indicadores de maior relevância quando se fala de mitigação dos impactos das mudanças climáticas na construção (Belizario-Silva *et al.*, 2023; Proietti *et al.*, 2013; Zabalza *et al.*, 2013).

Nesse sentido, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é um método que apresenta grande potencial para a mitigação de impactos ambientais, definida pela NBR ISO 14040 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” (ISO, 2014). Dentre as diversas categorias de impacto que podem ser estudadas pela ACV, diversas organizações apontam as emissões de CO₂ como prioridade ambiental (UNEP, 2023; WBCSD, 2021; WorldGBC, 2022), além de serem associadas a mais de 95% das emissões totais do setor da construção (IPCC, 2023).

No Brasil, a plataforma de Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (Sidac), disponibiliza dados brasileiros sobre energia primária e emissão de CO₂ de diversos produtos da construção, no escopo do berço ao portão da fábrica. Iniciativas como a criação do Sidac, ou mesmo a inserção de dados específicos brasileiros em bases de dados internacionalmente difundidas como a Ecoinvent, ajudam a responder a desafios como a complexidade, o custo e o tempo necessários para a coleta de dados para uma ACV, que são fatores que distanciam os profissionais da área da construção da prática de estimativa dos impactos de um projeto (Beemsterboer, Baumann, Wallbaum, 2020).

Além disso, o Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC) aponta que há uma lacuna de conhecimento no que diz respeito a falta de dados sobre diferentes tipos de edifício no escopo de emissões de CO₂, consumo de materiais ou de energia, além da falta de estudos de caso em países em desenvolvimento, como o Brasil (IPCC, 2023). Nesse contexto, o presente estudo contribuir para o progresso da discussão acerca dessas lacunas, apresentando um panorama da emissão de CO₂ estimada para a construção de modelos residenciais de padrão social, unifamiliares e térreos, no Brasil.

No campo da arquitetura, a ACV pode ser incorporada como método em diferentes fases do projeto arquitetônico, principalmente com o auxílio de ferramentas BIM e outras tecnologias digitais (Caldas *et al.*, 2022; Salgado, 2020), além de poder contribuir para a documentação digital de edificações já construídas por meio do conceito de passaporte de materiais (Munaro *et al.*, 2019; Hoosain *et al.*, 2021). Além disso, a literatura recente sobre o uso de ACV na área de arquitetura e construção mostra o método pode ser relacionado à busca pelo desenvolvimento sustentável, já tendo contribuído para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 e 15 (Bartolucci, Frasca, Bertolin, 2024; Meireles *et al.*, 2024; Bordbar *et al.*, 2023; Keles, Yazicioglu, 2023; Genta *et al.*, 2022; Onat *et al.*, 2021; Kucukvar *et al.*, 2021).

Uma das maiores dificuldades para a implementação da ACV é apontada por Caldas, Carvalho e Toledo Filho (2020), que afirmam que “quanto mais distante da etapa de concepção a ACV é realizada, menor será sua contribuição para uma maior sustentabilidade ambiental do projeto”. Em outras palavras, a ACV deve ser idealmente implementada nas fases iniciais de concepção do projeto de arquitetura, de forma a contribuir para a mitigação de impactos da forma mais eficiente. Por isso, a criação de indicadores de impacto para determinados produtos ou cenários apresenta-se como uma abordagem interessante do ponto de vista do arquiteto, que pode então tomar decisões baseadas na análise desses indicadores.

Entretanto, a falta de indicadores baseados em dados específicos para a realidade brasileira é um problema que interfere no nível de precisão das estimativas de impacto, conforme constatado por Carvalho (2020), que também trabalhou com ACV focada em CO₂ em uma residência unifamiliar brasileira.

Tendo essas problemáticas em vista, o presente estudo buscou criar e comparar indicadores de emissão de sistemas baseados em alvenaria com alternativas baseadas em madeira, considerando o potencial de redução nas emissões de CO₂ pelo uso prolongado de madeira (Amiri *et al.*, 2020; Hertwich *et al.*, 2019), comprovado por Orlandini e Punhagui (2024) para o escopo de habitação unifamiliar térrea. Assim, o presente trabalho contribui com a literatura ao propor indicadores de emissão específicos para o contexto nacional, tendo como unidade funcional o metro quadrado construído, escolha que foi feita para facilitar a incorporação desses indicadores por arquitetos na estimativa do impacto de projetos residenciais de padrão social.

2. MÉTODOS

A metodologia utilizada baseou-se na avaliação do ciclo de vida, conforme os princípios da NBR ISO 14040 (ABNT, 2014). As etapas metodológicas foram as seguintes: (i) delimitação, conforme os princípios da NBR ISO 14040 (ABNT, 2014) do escopo da ACV, e determinação da fronteira do sistema, a categoria de impacto a ser estudada e os requisitos de dados; (ii) modelagem dos cenários de estudo; (iii) levantamento de dados relacionados ao consumo e à emissão de CO₂ dos materiais utilizados em cada modelo; (iv) criação dos indicadores por sistema construtivo.

2.1. DELIMITAÇÃO DA ACV

O objetivo específico da ACV nesse estudo foi de quantificar as emissões de CO₂ de modelos residenciais selecionados, de forma a utilizar os resultados para a criação de indicadores de emissão por metro quadrado construído. Destaca-se que, conforme citado na NBR ISO 14040 (ABNT, 2014), a modelagem da ACV é sujeita a falhas e que os resultados apresentados são estimativas baseadas nos dados disponíveis no momento da modelagem. A fronteira do sistema utilizada é de A1-A3, o que significa que este estudo inclui somente as primeiras etapas do ciclo de vida das edificações: a extração da matéria prima, o transporte e a fabricação de cada material utilizado na construção das casas que foram estudadas, no escopo definido.

Além disso, a categoria de impacto limita-se ao potencial de aquecimento global. Essa escolha foi feita a partir do reconhecimento dessa categoria de impacto como referente a um dos indicadores mais relevantes da área da construção civil (Belizario-Silva *et al.*, 2023, Proietti *et al.*, 2013; Zabalza *et al.*, 2013). De acordo com a ISO 14067 (2018), para indicar o potencial de aquecimento global de um determinado produto, utiliza-se o termo “pegada de carbono”. Entretanto, cabe ressaltar que neste estudo foi considerada apenas a emissão de CO₂, deixando de fora do escopo outros gases de efeito estufa. Tal escolha foi feita pois o CO₂ é o gás que mais contribui para as emissões de gases de efeito estufa, e o principal gás em processos industriais como os de produção de insumos utilizados na construção civil (IPCC, 2023). Desse modo, foi calculada a pegada de CO₂ (e não de carbono).

Por fim, em relação aos requisitos de dados, foram utilizados dados secundários da plataforma Sidac (que foram, por sua vez, obtidos com fornecedores da indústria ou por consulta à literatura), e por consulta à literatura nacional ou bases de dados internacionais, como a Ecoinvent. No caso de existir mais de um fator de emissão em diferentes bases de dados, foi dada preferência por dados nacionais recentes, de modo que a ACV tenha um contexto geográfico e temporal.

2.2. DETERMINAÇÃO E MODELAGEM DOS CENÁRIOS DE ESTUDO

Considerando como objeto de estudo as residências unifamiliares brasileiras, térreas e de padrão social, a segunda etapa metodológica consistiu em identificar modelos de habitação de referência. Para os sistemas construtivos baseados em alvenaria, nomeadamente o sistema em concreto armado com vedação cerâmica (S1) e o sistema em alvenaria estrutural com blocos de concreto

(S2), foram considerados como referências três projetos padrão de habitação social no Brasil, que contam com dois dormitórios, sala, cozinha e banheiro:

- O projeto-padrão R1-B, conforme descrito pela NBR 12721 (ABNT, 2021), em sistema S1 com 58,64 m²;
- A casa padrão da Caixa Econômica Federal (2007), modelo MCMV, em sistema S2 com 41,87 m²;
- O modelo residencial de exemplo no caderno Mãos à Obra da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2010), de 39 m², nos sistemas S1 e S2.

Já para os cenários de construção baseada em madeira, *wood frame* (S3) e CLT (S4), foram selecionados sete modelos residenciais com base na pré-seleção feita por Orlandini (2021), que contava com 30 modelos. Destes, foram excluídos 23 que não apresentavam cotas legíveis, número de dormitórios diferente de dois, ou com área construída significativamente fora da faixa dos modelos considerados para S1 e S2 (com tolerância de 5%). Essa escolha foi feita para possibilitar a comparabilidade entre os diferentes cenários, excluindo, portanto, casas com menos de 37,05 m² e mais de 61,57 m². Após a seleção, os sete modelos restantes foram nomeados de A a H, variando em área total construída entre 41,16 m² e 57,27 m², sendo 50,18 m² a área média entre os sete.

2.3. LEVANTAMENTO DOS DADOS DE CONSUMO E EMISSÕES

Os insumos considerados para a produção dos modelos residenciais baseados em alvenaria foram ser divididos em cinco categorias: (i) concretos, (ii) argamassas, (iii) blocos, (iv) aço e (v) madeira, enquanto os insumos dos modelos baseados em madeira foram divididos entre (i) madeira estrutural e (ii) outros.

A Figura 1 mostra os materiais considerados para cada projeto e sistema construtivo. Cabe ressaltar que, em todos os cenários, as emissões de CO₂ serão estimadas com base nos materiais utilizados para as paredes e estrutura das casas, com o revestimento básico para habitabilidade. Não foram consideradas, portanto, as emissões relacionadas à construção de pisos, fundações, instalações, esquadrias, coberturas e telhados.

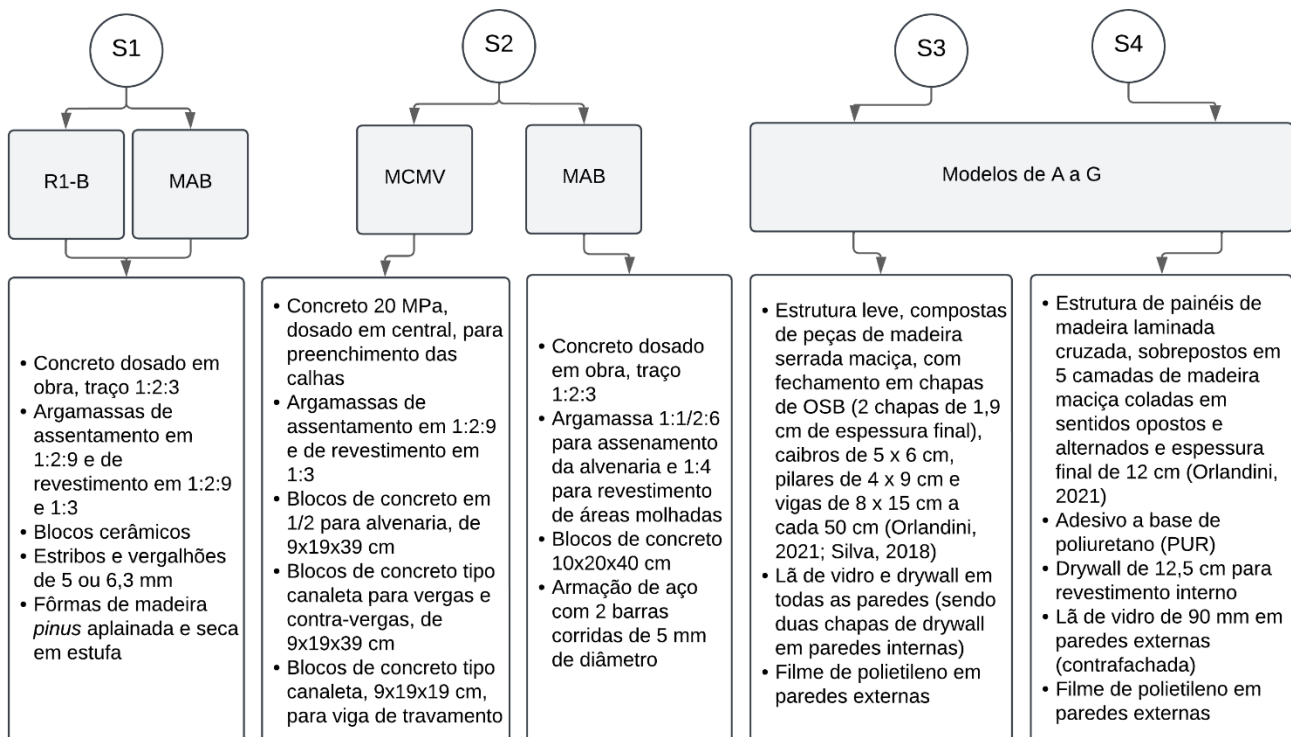


Figura 1: Lista de insumos por modelo residencial.

Fonte: Os autores (2025), com base em Orlandini e Punhagui (2024), CAIXA (2007), ABCP (2010) e Costa (2012).

O consumo adotado para cada material nos quatro sistemas foi calculado a partir das plantas baixas dos modelos residenciais estudados, conforme já explicitado no item 2.2. Considerando os materiais descritos na Tabela 1, destaca-se que:

- em todos os casos, supôs-se um pé direito de 2,8 m;
- nos sistemas S1 e S2, o consumo de concreto foi baseado no uso de vigas e pilares de 15 por 30 cm;
- nos sistemas S3 e S4, foram utilizados os valores de referência de consumo de madeira estrutural por m³ com base em Orlandini e Punhagui (2024).

Em relação aos dados sobre emissões de CO₂, para a maioria dos materiais foram utilizados os dados brasileiros da plataforma Sidac, com exceção dos fatores de emissão 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.

2.4. CRIAÇÃO DOS INDICADORES POR SISTEMA

Após o levantamento dos dados necessários, foi feita uma ACV simplificada para estimativa de emissões de CO₂ foi feita para os modelos residenciais já descritos. Para a criação dos indicadores por sistema, foi feito o levantamento das emissões mínimas, médias e máximas por material, em cada modelo residencial, para os diferentes sistemas construtivos. Os resultados de emissão total e por material foram divididos pela área construída do respectivo modelo residencial, no caso dos sistemas S1 e S2, e pela área construída média entre os modelos A e G, no caso de S3 e S4.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos podem ser divididos em dois tipos: (i) emissões por material e (ii) emissões por sistema construtivo. A Figura 2 apresenta os resultados de primeiro tipo, considerando as emissões médias, em kgCO₂ por metro quadrado construído, nos sistemas S1 e S2.

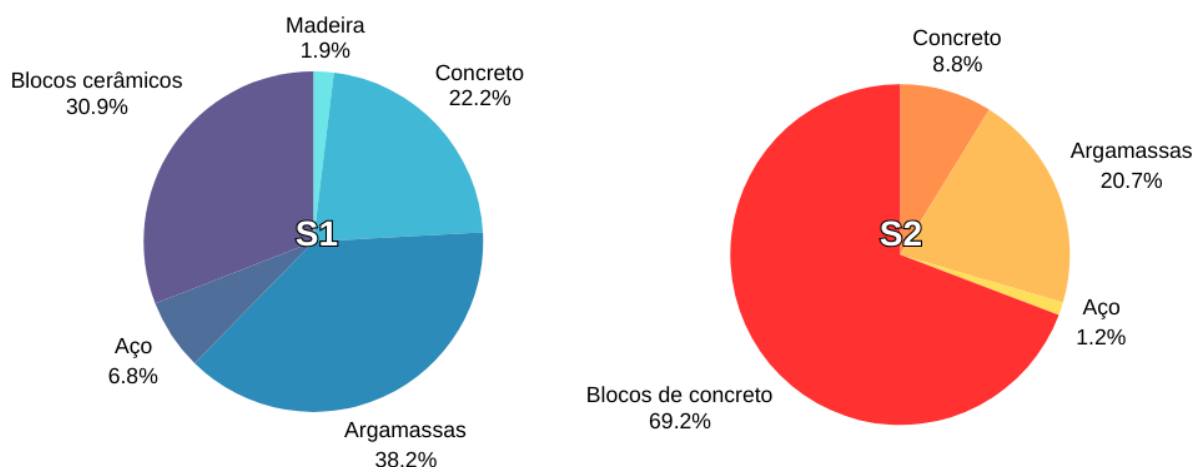


Figura 2: Indicadores de emissão de CO₂ por material, nos sistemas S1 e S2.
Fonte: Os autores (2025).

De modo geral, os resultados indicam que no sistema de alvenaria cerâmica com estrutura de concreto armado, a categoria de insumo mais impactante é a de argamassas, seguida pelos blocos cerâmicos e pelo concreto. Nesse caso, o impacto da madeira e do aço é relativamente bem menor, já que o consumo desse tipo de material também é inferior. Já no sistema de alvenaria estrutural com blocos de concreto, eles representam quase 70% das emissões totais de CO₂ em uma habitação de padrão social, seguidos pelo grupo das argamassas.

Abaixo, na Figura 3, são apresentados os indicadores de emissão de CO₂ por sistema construtivo, que se encaixam como resultados de segundo tipo. Os valores apresentados consideram as emissões médias, em kgCO₂, por metro quadrado construído.

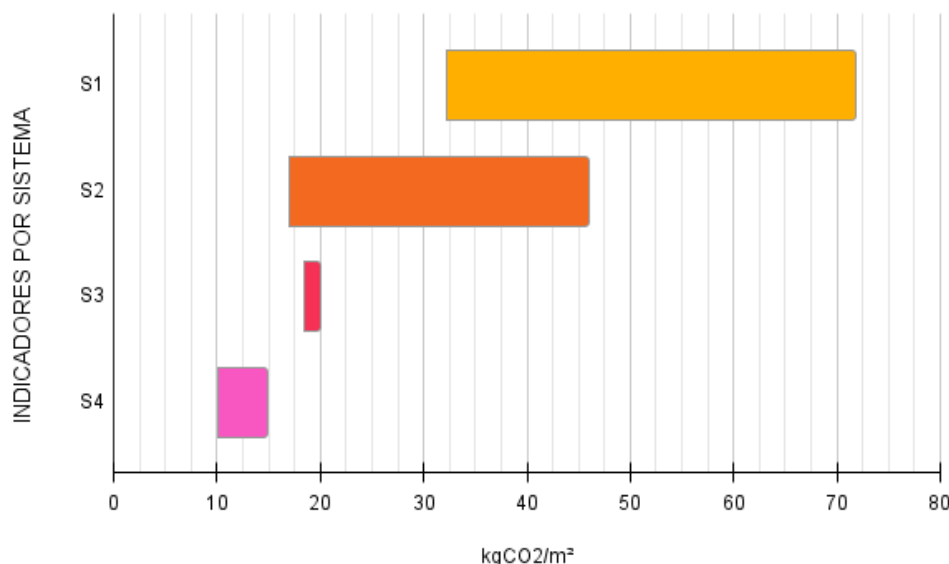


Figura 3: Indicadores de emissão de CO₂ por sistema construtivo.
Fonte: Os autores (2025).

Na comparação dos indicadores por sistema, destaca-se a diferença significativa entre as emissões médias de CO₂ por metro quadrado construído entre os diferentes sistemas. Enquanto S1 e S2 apresentaram as maiores emissões médias, os sistemas baseados em madeira podem chegar a representar um impacto até sete vezes menor, se compararmos o melhor cenário em S4 com o pior cenário em S1.

Mais especificamente, o sistema CLT (S4) mostrou-se como o de menor emissão média entre os sistemas analisados, reforçando seu potencial como estratégia de mitigação de carbono na construção civil. O sistema S3 apresentou resultados próximos, embora ligeiramente superiores, com uma variação interna relativamente baixa em comparação com os demais sistemas.

Por fim, a maior variação dos indicadores nos sistemas baseados em alvenaria tem relação com a variação dos níveis de emissão do concreto, conforme destaca o *market share* apresentado em Reis e John (2022) e ao processo de produção dos blocos cerâmicos, conforme destacam Cleto, Von Mühlen e Belizario-Silva (2022).

4. CONCLUSÕES

O presente estudo evidenciou que o potencial de redução das emissões de CO₂ incorporado (A1-A3) atrelado ao uso de sistemas construtivos baseados em madeira, nomeadamente o *wood frame* e o CLT, quando comparados aos sistemas construtivos tradicionais baseados em alvenaria e concreto.

Os resultados reforçam a importância da Avaliação do Ciclo de Vida como ferramenta de apoio à tomada de decisões desde as fases iniciais do projeto arquitetônico, especialmente no contexto de políticas públicas voltadas à habitação social.

Entre os principais achados, destacam-se:

- a) A emissão média nos sistemas baseados em alvenaria é de 52,05 kgCO₂/m² no sistema S1 e 31,5 kgCO₂/m² no sistema S2;
- b) A emissão média dos sistemas baseados em madeira é de 19,27 kgCO₂/m² no sistema S3 e 12,5 kgCO₂/m² no sistema S4;
- c) As argamassas e os blocos de vedação ou estruturais são os responsáveis pela maior fração de emissões nos sistemas em alvenaria.

Entre as limitações do estudo, destacam-se a exclusão do fim de vida útil dos materiais e das emissões biogênicas, além da ausência de dados precisos sobre fundações, coberturas e instalações. Pesquisas futuras podem aprofundar a análise incluindo ciclos completos de vida, avaliação econômica e desempenho energético das edificações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12721: Avaliação de custos unitários de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edilícios**. Rio de Janeiro, 2021.

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

AMIRI, A.; OTTELIN, J.; SORVARI, J.; JUNNILA, S. Cities as carbon sinks—classification of wooden buildings. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 9, p. 094076, 2020.

BARTOLUCCI, B.; FRASCA, F.; BERTOLIN, C. LCA- and nZER-based methodology for identifying optimal low environmental impact interventions for existing buildings. **Energy for Sustainable Development**, v. 82, p. 101543, 2024.

BEEMSTERBOER, S.; BAUMANN, H.; WALLBAUM, H. 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, 2020.

BELIZARIO-SILVA, F.; OLIVEIRA, L. S.; REIS, D. C.; COSER, A.; PATO, G.; YOSHIDA, O.; DEGANI, C.; PUNHAGUI, K.; PACCA, S.; JOHN, V. **Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção – Metodologia**. 1ª ed. São Paulo: SIDAC, 2022.

BORDBAR, B.; KHOSRAVI, A.; ABDOLLAHI, F.; HASHEMIFARD, S. A.; KARAGÖZ, S. An insight into environmental footprints of emerging air-conditioning systems towards sustainable cities. **Sustainable Cities and Society**, v. 98, p. 104830, 2023.

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

CALDAS, L. R.; CARVALHO, M. T. M.; TOLEDO FILHO, R. D. Inserção da ACV no processo de projeto de edificações: avaliação de alternativas e ferramentas computacionais para a prática de mercado. **Paranoá**, v. 13, n. 28, 2020.

CALDAS, L. R.; SILVA, M. V.; SILVA, V. P.; CARVALHO, M. T. M.; TOLEDO FILHO, R. D. How Different Tools Contribute to Climate Change Mitigation in a Circular Building Environment? — A Systematic Literature Review. **Sustainability**, v. 14, n. 7, p. 3759, 2022.

CARVALHO, T. N. Diretrizes da avaliação do ciclo de vida aplicadas à tomada de decisões em projeto. In: SALGADO, M. S.; SILVOSO, M. M.; GRABOIS, T. M. **Arquitetura, Materialidade e**

Tecnologias Digitais: Aplicações na produção e conservação do ambiente construído. Rio de Janeiro: PROARQ-FAU/UFRJ, Paisagens Híbridas, 2020.

CLETO, F. R.; VON MÜHLEN, J. F.; BELIZARIO-SILVA, F. **Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção:** blocos e telhas cerâmicos. São Paulo: SIDAC, 2022.

COSTA REIS, D.; JOHN, V. **Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção:** Concreto. São Paulo: SIDAC, 2022.

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

GENTA, C.; SANYÉ-MENGUAL, E.; SALA, S.; LOMBARDI, P. 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, p. 103679, 2022.

HERTWICH, E. G.; ALI, S.; CIACCI, L.; FISHMAN, T.; HEEREN, N.; MASANET, E.; ASGHARI, F. N.; OLIVETTI, E.; PAULIUK, S.; TU, Q.; WOLFRAM, P. Material efficiency strategies to reducing greenhouse gas emissions associated with buildings, vehicles, and electronics—a review. **Environmental Research Letters**, v. 14, n. 4, p. 043004, 2019.

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. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf. Acesso em: 21 jan. 2025.

JIANG, G.; ZUO, L.; ASUTOSH, A. T.; ZHANG, J. Environmental Sustainability Study of Urban Waterfront Landscapes Based on the LCA–Emergy–Carbon Footprint and Artificial Neural Network Method. **Buildings**, v. 14, n. 2, p. 386, 2024.

KELES, C.; YAZICIOGLU, F. 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, p. 298-324, 2023.

KUCUKVAR, M.; KUTTY, A. A.; AL-HAMRANI, A.; KIM, D.; NOFAL, N.; ONAT, N. C.; ERMOLAEVA, P.; AL-ANSARI, T.; AL-THANI, S. K.; AL-JURF, N. M.; BULU, M.; AL-NAHHAL, W. 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, p. 106665, 2021.

KYLILI, A.; MILOS, I.; FOKAIDES, P. 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, 2017.

MEIRELES, I.; MARTÍN-GAMBOA, M.; SOUSA, V.; KALTHOUM, A.; DUFOUR, J. Comparative environmental life cycle assessment of partition walls: Innovative prefabricated systems vs conventional construction. **Cleaner Environmental Systems**, v. 12, p. 100179, 2024.

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.

ONAT, N. C.; ABDELLA, G. M.; KUCUKVAR, M.; KUTTY, A.; AL-NUAIMI, M.; KUMBAROGLU, G.; BULU, M. 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, 2021.

PROIETTI, S.; SDRINGOLA, P.; DESIDERI, U.; ZEPPARELLI, F.; MASCIARELLI, F.; CASTELLANI, F. Life Cycle Assessment of a passive house in a seismic temperate zone. **Energy and Buildings**, v. 64, p. 463–472, 2013.

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

SIDAC. **Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção**. 2022. Disponível em <https://Sidac.org.br/>. 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, I.; SCARPELLINI, S.; ARANDA, A.; LLERA, E.; JÁÑEZ, A. 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, 2013.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências brasileiras de fomento à pesquisa CAPES, CNPq e FAPERJ pelo suporte financeiro. Este projeto de pesquisa é parcialmente financiado pela FAPERJ (Processo nº E-26/201.369/2022).