PEGADA DE CARBONO NA CONSTRUÇÃO CIVIL BRASILEIRA: UMA COMPARAÇÃO COM AS PRINCIPAIS ECONOMIAS GLOBAIS

CARBON FOOTPRINT IN BRAZILIAN CIVIL CONSTRUCTION: A COMPARISON WITH LEADING GLOBAL ECONOMIES

Celso da Silveira Cachola [1]; Drielli Peyerl [2].

[1] Mestre| celsocachola@usp.br | USP | São Paulo, Brasil; [2] Doutora | d.peyerl@uva.nl | UVA/USP | Amsterdã, Países Baixos.

Resumo:
O presente estudo investiga a pegada de carbono associada às obras de construção civil no Brasil, utilizando a base de dados *Exiobase* e o software OpenLCA com o método de cálculo *CML 2001 – baseline*. A análise é conduzida por meio de um modelo insumo-produto multirregional (MRIO), com foco no produto "obras de construção civil", e inclui uma comparação com as cinco maiores economias globais em termos de Produto Interno Bruto (China, Estados Unidos, Alemanha, Japão e Índia). Os resultados indicam que a pegada de carbono brasileira é de 0,97 $kgCO_2e$/EUR, inferior à da China e da Índia, mas superior à dos demais países analisados. A produção de cimento e cal se destaca como o principal processo emissor, seguida por emissões diretas das atividades de construção e pelo uso de insumos como ferro e aço. A análise estatística (ANOVA) revelou que, embora não haja diferenças significativas entre os países, os processos emissores variam de forma estatisticamente significativa. Este trabalho contribui para a compreensão dos impactos climáticos da construção civil no Brasil e apoia o desenvolvimento de estratégias alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

Palavras-chave:
Pegada de Carbono; Emissões de CO_2; Modelo Insumo-produto Multirregional (MRIO); Construção Civil; Brasil.

Abstract:
This study investigates the carbon footprint associated with civil construction works in Brazil, using the Exiobase database and the OpenLCA software with the CML 2001 – baseline method. The analysis is conducted through a multiregional input-output (MRIO) model, focusing on the product "civil construction works" and includes a comparison with the five largest global economies in terms of Gross Domestic Product (China, the United States, Germany, Japan, and India). The results indicate that Brazil's carbon footprint is 0.97 $kgCO_2e$/EUR, lower than that of China and India, but higher than that of the other countries analyzed. Cement and lime production stands out as the main emission source, followed by direct emissions from construction activities and the use of inputs such as iron and steel. Statistical analysis (ANOVA) revealed that, although there are no statistically significant differences between countries, the variation among emission sources is statistically significant. This study contributes to the understanding of the climate impacts of the construction sector in Brazil and supports the development of strategies aligned with the Sustainable Development Goals.

Keywords:
Carbon Footprint; CO_2 Emissions; Multiregional Input-Output Model (MRIO); Construction; Brazil.

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil apresenta um expressivo potencial de crescimento e investimento, consolidando-se como um dos setores industriais mais dinâmicos e um vetor central do crescimento econômico global (Onat e Kucukvar, 2020). Esse setor tem desempenhado um papel estratégico na transformação das sociedades ao longo das últimas décadas, impulsionado pelo aumento dos investimentos em infraestrutura, habitação, energia e transporte (Onat e Kucukvar, 2020). Além disso, as obras de construção civil se destacam como elementos fundamentais das economias nacionais, contribuindo significativamente para a expansão do Produto Interno Bruto (PIB) dos países (Onat e Kucukvar, 2020).

Para além dos aspectos econômicos, as implicações ambientais da construção civil também merecem destaque, especialmente no que diz respeito às emissões de carbono, reconhecidamente um dos principais vetores das mudanças climáticas (IPCC, 2023). Nesse contexto, a construção civil - considerando materiais, obras, edificações e uso da habitação – é responsável globalmente por aproximadamente 37% a 40% das emissões antrópicas de Gases de Efeito Estufa (GEE) (Zhao *et al*., 2025). Dentre essas emissões, pelo menos 25% correspondem a emissões incorporadas, originadas nos processos de construção e desconstrução de materiais como concreto, aço e alumínio, abrangendo toda a quantidade de GEE liberada ao longo do ciclo de vida desses materiais (ASHRAE, 2022).

No Brasil, em 2024, a construção civil representou 3,6% do PIB nacional (CBIC, 2025). Em termos de emissões de GEE, apenas a indústria da construção – considerando apenas o canteiro de obras - foi responsável por 6% das emissões nacionais, totalizando aproximadamente 139 milhões de toneladas de dióxido de carbono (CO_2) por ano (Brasil, 2023). Embora esse percentual seja inferior aos 40% globais, ele não reflete plenamente a realidade brasileira, uma vez que o país possui uma parcela significativa de suas emissões derivadas do uso e mudança do solo, bem como da agropecuária, o que reduz proporcionalmente a participação da construção civil no total de emissões nacionais. No entanto, a indústria, de modo geral, permanece um setor de difícil mitigação, demandando estratégias específicas para a redução de suas emissões.

Diante das crescentes preocupações ambientais e das pressões regulatórias impostas por acordos internacionais, como o Acordo de Paris, além das exigências do mercado, torna-se fundamental buscar alternativas mais sustentáveis nas cadeias de bens e serviços. No Brasil, algumas iniciativas, como o CECarbon (CECarbon, 2025) – que se limita apenas a calcular o inventário de GEE de construtoras - e o SISTEMA DE INFORMAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL DA CONSTRUÇÃO - SIDAC (SIDAC, 2025) – limitando-se a calcular apenas alguns impactos ambientais de insumos da construção -, estão sendo desenvolvidas para contribuir na quantificação das emissões de GEE e de outros impactos ambientais da construção civil, além de auxiliar na tomada de decisão sobre a escolha de materiais mais sustentáveis. No entanto, ainda persiste uma lacuna significativa de estudos que avaliem os impactos ambientais ao longo de toda a cadeia produtiva da construção civil brasileira.

Com base nos pontos apresentado acima, o presente artigo parte da seguinte questão norteadora: "Qual é o impacto da cadeia produtiva das obras de construção civil brasileiras nas mudanças climáticas e quais são seus principais processos emissivos?" Este estudo tem como objetivo identificar a pegada de carbono do berço ao túmulo – considerando: (i) extração de matérias-primas; (ii) manufatura de insumos primários; (iii) transporte; (iv) queima de combustíveis na obra; e (v) disposição final dos resíduos - ao longo da cadeia da construção civil no Brasil, comparando-a com as cinco maiores economias globais: Estados Unidos, China, Alemanha, Japão e Índia. A metodologia adotada consiste na análise da pegada de carbono por meio de um modelo insumo-produto multirregional (MRIO), utilizando os dados do *Exiobase* 3.4 processados no software *OpenLCA*.

Diferentemente de abordagens que analisam setores econômicos amplos, este estudo foca especificamente em 'obras de construção civil', representadas no *Exiobase* pelo setor *Construction work* (código 45) - código dos produtos do *Exiobase* -. Este setor contempla os serviços realizados

nos canteiros de obras, como a execução de edificações, infraestrutura, reformas e manutenções e suas emissões indiretas. Portanto, estão excluídas de forma direta a fabricação de materiais de construção (como cimento, cal, ferro e aço), mas que são consideradas emissões indiretas (escopo 3). No modelo *Exiobase*, tais serviços são tratados como um dos 200 produtos disponíveis, e seus impactos ambientais são calculados com base nos fluxos monetários da cadeia produtiva completa.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Para medir a pegada de carbono de um determinado produto ou serviço, a literatura distingue dois principais métodos: a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de produto e a análise insumo-produto (Yan, Dietzenbacher e Los, 2024). As ACVs são amplamente utilizadas para avaliar os impactos ambientais de bens e serviços específicos no nível micro, contabilizando as emissões e os recursos utilizados ao longo de todo o ciclo de vida do produto, da produção à distribuição e ao descarte (Yan, Dietzenbacher e Los, 2024). Já o modelo insumo-produto avalia os efeitos ambientais ao longo dos ciclos de vida completos de todos os produtos, abrangendo todos os impactos diretos e indiretos da cadeia de suprimentos (Yan, Dietzenbacher e Los, 2024).

A literatura sobre pegada de carbono do consumo doméstico, desenvolvida ao longo das últimas duas décadas, reúne contribuições relevantes que utilizam modelos insumo-produto para identificar padrões de consumo mais sustentáveis por meio de modelos insumo-produto (Cachola e Pacca, 2023; Hubacek *et al*., 2017; Jones e Kammen, 2011; Steen-Olsen, Wood e Hertwich, 2016; Zen *et al*., 2021). Outros trabalhos se concentram em setores econômicos específicos, como a indústria têxtil (Giacomin e Pacca, 2024), ou buscam comparar diferentes padrões de emissões, como é o caso do estudo que analisa as emissões nas fases de construção e uso residencial entre moradores de casas de madeira e não madeira na Finlândia, utilizando um modelo híbrido com dados da base *Exiobase* (Ottelin *et al*., 2021).

Na literatura internacional, Onat e Kucukvar (2020) realizaram uma revisão bibliográfica e uma análise da cadeia de suprimentos em nível macro, com foco na pegada de carbono da indústria da construção mundial, no período de 2009 a 2020, utilizando a base de dados Scopus. Os resultados mostraram que, dos 115 artigos selecionados, aproximadamente 60% focaram na indústria da construção chinesa. A maioria dos estudos analisou as pegadas de carbono em nível nacional (75%) e municipal (18%) (Onat e Kucukvar, 2020).

De acordo com Onat e Kucukvar (2020), China, Estados Unidos, Índia e Japão apresentaram emissões de GEE na construção civil majoritariamente indiretas - isto é, associadas a processos que não ocorrem diretamente na operação do setor, mas ao longo de suas cadeias de suprimento. Em todos esses países, a maior parte dessas emissões indiretas ocorre dentro do território nacional (Onat e Kucukvar, 2020). Na China, por exemplo, 90% das emissões da construção são indiretas, com destaque para os setores de fornecimento de eletricidade, gás e água (36,3%), outros minerais não metálicos (19,7%), mineração (12,9%) e metais básicos e fabricados (8,6%) (Onat e Kucukvar, 2020). No Japão, 51,6% das emissões indiretas ocorrem internamente, sobretudo nos setores de outros minerais não metálicos (13,7%), metais básicos e fabricados (12,3%) e a própria construção (12,0%) (Onat e Kucukvar, 2020). Nos Estados Unidos, 62,8% das emissões da construção são indiretas e originam-se, em sua maioria, de atividades domésticas, como fornecimento de eletricidade, gás e água (16,7%), outros minerais não metálicos (12,7%) e a própria construção (9,9%) (Onat e Kucukvar, 2020). Por fim, na Índia, 86,1% das emissões são indiretas e ocorrem dentro do país, com maior participação dos setores de fornecimento de eletricidade, gás e água (41,2%), outros minerais não metálicos (16,2%) e metais básicos e fabricados (9,1%) (Onat e Kucukvar, 2020).

Apesar de as políticas dos países terem se concentrado principalmente na redução das emissões de GEE durante a fase de uso de energia nos edifícios, estudos recentes enfatizam a importância de abordar também as emissões geradas na fase de construção (Imada, Maeno e Kagawa, 2024). A taxonomia da União Europeia já considera a obrigatoriedade de divulgação de informações sobre o carbono incorporado em materiais utilizados na construção de novos edifícios (Imada, Maeno e

Kagawa, 2024). A certificação LEED, uma das principais certificações de sustentabilidade para edificações, adota uma abordagem holística para a avaliação de produtos e materiais de construção (LEED, 2020). A categoria de crédito “Materiais e Recursos” (MR) no LEED v4.1 contempla critérios como a reutilização de edificações, a ACV da construção como um todo, declarações ambientais de produto (DAPs), otimização de materiais, fornecimento responsável de matéria-prima e estratégias para redução e gerenciamento de resíduos (LEED, 2020).

Embora este estudo não aborde a etapa de uso das edificações, pesquisas anteriores demonstram que as emissões geradas nessa fase são frequentemente superiores às da fase de construção, especialmente quando comparadas as pegadas de carbono entre diferentes classes sociais (Cachola e Pacca, 2023). Famílias de maior renda tendem a emitir mais na categoria de habitação do que famílias de menor renda, evidenciando disparidades nas emissões relacionadas ao consumo habitacional (Cachola e Pacca, 2023). Também se observa que países em desenvolvimento, como China, Turquia, Argélia e África do Sul, apresentam emissões *per capita* consideráveis associadas à construção e à manufatura, enquanto países desenvolvidos, como Reino Unido, Estados Unidos, Holanda e Alemanha, apresentam emissões *per capita* mais associadas ao uso das edificações (Cachola e De Souza, 2024).

3. MÉTODOS

A metodologia deste estudo é estruturada em três grandes etapas:

I. *Download* dos dados do *Exiobase* e importação no *OpenLCA, versão 2.4*;

II. Criação dos fluxos e cálculo das emissões pelo método *‘CML, 2001 – baseline’,* aplicado aos produtos do Brasil, Alemanha, China, Estados Unidos, Índia e Japão – as cincos maiores economias globais, por isso foram selecionadas para o estudo -;

III. Análise dos resultados, incluindo a identificação de possíveis alternativas de mitigação das emissões de GEE e a avaliação da significância estatística dos dados.

A Figura 1 apresenta a sequência metodológica do estudo.

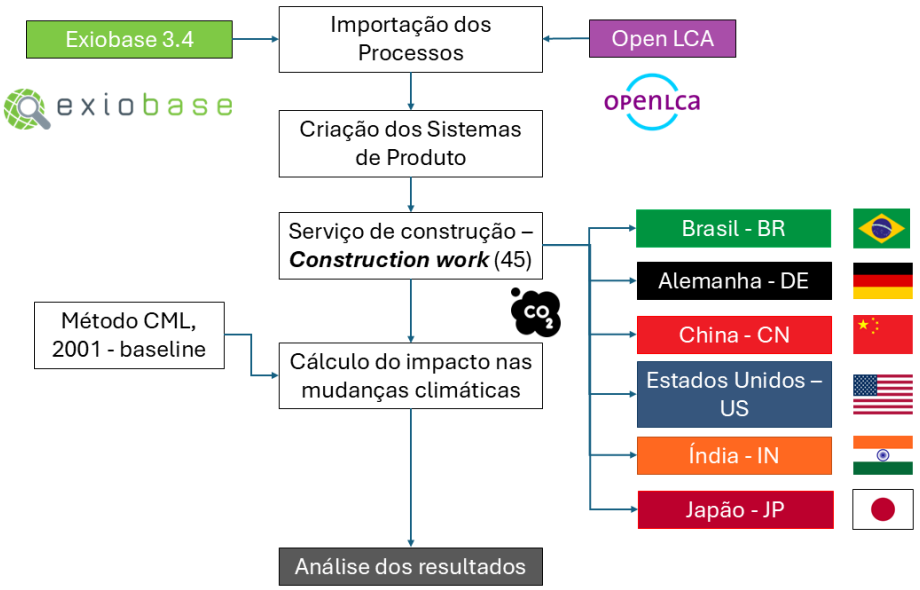

Figura 1: Procedimento metodológico.
Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

O método utilizado foi o '*CML 2001 – baseline'*, pois já vem instalado no pacote do *Exiobase* no *OpenLCA*, e os outputs - emissões de CO_2 e outros poluentes - estão configurados para esse método.

A análise dos fluxos econômicos do sistema de produtos para cada país revela a complexa cadeia de fornecimento do setor de construção e suas particularidades nacionais. Observa-se uma variação considerável no custo agregado dos insumos, com a China ($0,727) apresentando a estrutura mais intensiva em materiais e o Brasil ($0,420) a menos intensiva. O papel do cimento como um custo direto também flutua de forma proeminente: na Alemanha, é o principal insumo industrial identificado ($0,051), enquanto na China ($0,043) e nos Estados Unidos ($0,035) é um componente chave, mas superado por outros setores. Destacam-se ainda particularidades como a forte influência de 'Produtos cerâmicos' na China e de 'Serviços empresariais' nos EUA e Japão, evidenciando diferentes modelos de desenvolvimento na cadeia de valor da construção.

O *Exiobase* é um modelo insumo-produto multirregional estruturado em fluxos monetários, diferentemente de uma ACV tradicional, que trabalha com fluxos físicos unitários de produtos. Portanto, os impactos são calculados com base nos fluxos econômicos das atividades, ou seja, de forma simplificada, enquanto cada produto consumiu financeiramente de outros produtos ou serviços econômicos.

Um diferencial importante do modelo multirregional é que ele considera as emissões de energia e materiais ao longo de toda a cadeia de valor - do berço ao túmulo. Isso inclui desde a extração de matérias-primas, passando pela manufatura de insumos primários (como cimento, cal e ferro), transporte intermediário, queima direta de combustíveis (como ocorre em escavadeiras, retroescavadeiras e demais equipamentos de obra), até a disposição final de resíduos gerados pelas atividades de construção.

Conforme mencionado, a análise dos fluxos financeiros baseia-se na estrutura do *Exiobase*, que representa os setores econômicos em termos monetários. Para cada país e setor analisado, o modelo calcula os fluxos econômicos necessários para gerar 1 euro de demanda final em determinado produto - no caso, o serviço de 'obras de construção'. A soma dos fluxos de entrada geralmente é inferior a 1 euro, pois não inclui margens de comércio, impostos, lucros, nem todos os elementos da cadeia de valor final, além de parte do valor ser atribuída ao próprio setor analisado (consumo próprio). Portanto, esses fluxos servem de base para o rastreamento das emissões ao longo da cadeia produtiva.

3.1. TRATAMENTO DOS DADOS E ANÁLISE DE SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA

Os resultados são exportados do *OpenLCA* para o Excel e compilados em um único arquivo. Com os dados compilados, são criados gráficos na linguagem R por meio das bibliotecas ggplot2 e dplyr, resultando nas Figuras 2 e 3.

Por fim, é analisada a significância estatística das médias por meio da ANOVA. A ANOVA é uma técnica estatística utilizada para comparar as médias de três ou mais grupos ou condições e verificar se há diferenças significativas entre elas. São analisadas duas hipóteses: a hipótese nula, que assume que todas as médias dos grupos são iguais (valor de $p > 0,05$), e a hipótese alternativa, que postula que pelo menos uma das médias dos grupos é diferente (valor de $p < 0,05$). Neste trabalho, foram analisadas as médias das pegadas de carbono entre os países e entre os processos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dentre as pegadas de carbono analisadas, considerando as emissões de GEE diretas - apenas os serviços realizados nos canteiros de obras, como a execução de edificações, infraestrutura, reformas e manutenções – e as emissões indiretas – emissões na extração e manufatura de insumos primários -, a de obras de construção brasileira (0,97 $KgCO_2e$/EUR) foi a terceira maior, atrás das pegadas de carbono da chinesa (2,21 $KgCO_2e$/EUR) e da indiana (1,43 $KgCO_2e$/EUR).

As pegadas de carbono das obras de construção alemã (0,39 $KgCO_2e$/EUR), americana (0,33 $KgCO_2e$/EUR) e japonesa (0,25 $KgCO_2e$/EUR) foram relativamente mais baixas do que a brasileira. Os principais direcionadores mostraram-se diferentes para cada país; entretanto, o processo de cimento, cal e gesso foi o mais significativo em todos os países (valores entre 0,08 e 0,84 $KgCO_2e$/EUR), com exceção da Alemanha, onde o maior direcionador foi o próprio processo de obras de construção. A Índia e a China apresentaram emissões relativamente altas no processo de eletricidade a partir de carvão (0,38 $KgCO_2e$/EUR e 0,53 $KgCO_2e$/EUR, respectivamente), diferenciando-se dos outros países, sendo que apenas o Brasil não apresentou emissões nesse processo. Outro setor relevante foi o de ferro e aço básicos, com emissões significativas na China (0,23 $KgCO_2e$/EUR), Índia (0,19 $KgCO_2e$/EUR) e Brasil (0,05 $KgCO_2e$/EUR). A Figura 2 ilustra esses resultados.

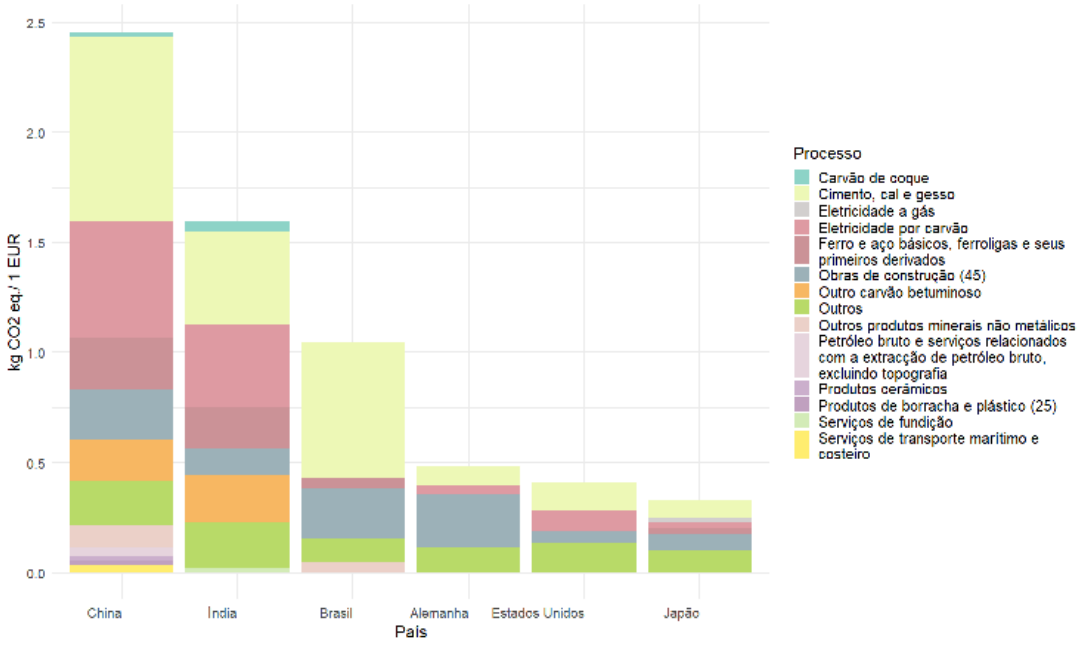

Figura 2: Emissões de dióxido de carbono equivalente de serviços de construção por país analisado e processo.
Fonte: os autores (2025).

As emissões diretas de carbono no setor advêm majoritariamente do uso de equipamentos como escavadeiras, guindastes, geradores e outras máquinas movidas a combustíveis fósseis, como diesel e gasolina. Para a realidade brasileira, a substituição desses equipamentos por versões elétricas configura-se como uma alternativa viável à descarbonização, sobretudo quando associada ao uso de energia proveniente de fontes renováveis. Adicionalmente, medidas como a otimização dos processos construtivos, a realização de manutenções periódicas nos equipamentos e um planejamento logístico eficiente também contribuem para a mitigação das emissões diretas.

Embora possa parecer contraintuitivo que a pegada de carbono da construção civil no Brasil seja superior à de países como Estados Unidos, Alemanha e Japão - cujas matrizes energéticas são majoritariamente baseadas em combustíveis fósseis -, tal discrepância pode ser atribuída à elevada intensidade de emissões dos insumos utilizados no contexto brasileiro, como o aço, cimento e gesso. Especificamente no setor siderúrgico, embora parte da produção empregue carvão vegetal, grande parte das plantas ainda recorre ao uso de coque de carvão mineral no processo de redução, o que eleva substancialmente as emissões associadas desse setor (De Souza e Pacca, 2021).

No caso do cimento, os fatores de emissão observados no Brasil são significativamente mais altos do que os registrados nos Estados Unidos, conforme apontado pelos dados do *Exiobase*. Entretanto, as emissões do setor de “Cimento, cal e gesso” no Brasil podem estar superestimadas, ou as emissões americanas subestimadas. Como o *Exiobase* utiliza uma abordagem de desagregação de dados, os dados de origem podem estar sujeitos a erros, extrapolações e incertezas, o que pode gerar valores discrepantes (*Small World Consulting Ltd*, 2023). Segundo

Kihara, a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) (Kihara, ABCP e SNIC, 2014), as emissões de CO_2 do cimento no Brasil são menores do que na América do Norte, Europa e Japão. Dessa forma, a pegada de carbono da construção civil brasileira poderia ser comparável à da Alemanha e dos Estados Unidos.

Adicionalmente, o agrupamento setorial utilizado no *Exiobase* - que consolida as atividades de produção de cimento, cal e gesso em um único setor - pode influenciar a intensidade média das emissões atribuídas entre países. Nos Estados Unidos, uma parcela significativa da produção de gesso ocorre por meio da dessulfurização dos gases de combustão (gesso FGD), processo que demanda menos energia térmica e resulta em emissões diretas consideravelmente mais baixas (Baran *et al*., 2021; Ranganath, McCord e Sick, 2024). No Brasil, por outro lado, a produção de gesso concentra-se majoritariamente na calcinação da gipsita natural em sistemas térmicos (Santos e Giovanetti, 2019). Essa diferenciação tecnológica e energética entre os países pode contribuir para que o setor "Cimento, cal e gesso" apresente maior intensidade de emissões no Brasil, mesmo diante de uma matriz energética nacional mais renovável em termos agregados.

Os principais direcionadores das pegadas de carbono são produtos carbono-intensivos e setores *hard-to-abate*. O setor de cimento apresenta emissões devido ao processo industrial de transformação do clínquer, sendo difícil a mitigação dessas emissões. Uma possível alternativa seria a implementação da tecnologia de captura de carbono em plantas cimenteiras (Cachola *et al.*, 2023). A captura de carbono também pode ser uma alternativa para a mitigação das emissões de CO_2 no setor de ferro e aço básico (Cachola *et al*., 2023), assim como a utilização do hidrogênio renovável, resultando na produção de aço verde (Harpprecht *et al*., 2022; Tikadar, Swami e Chowdhary, 2025). Essas medidas reduziriam as emissões desses processos e, consequentemente, a pegada de carbono das obras de construção, sem alterar os materiais estruturais historicamente utilizados.

Em todas as pegadas de carbono das obras de construção analisadas neste estudo, a maior parte das emissões ocorreu dentro do próprio país: Brasil (97,51% – 0,95 $kgCO_2e$/EUR), China (98,20% – 2,17 $kgCO_2e$/EUR), Índia (91,29% – 1,31 $kgCO_2e$/EUR), Alemanha (95,10% – 0,37 $kgCO_2e$/EUR), Estados Unidos (89,14% – 0,29 $kgCO_2e$/EUR) e Japão (89,78% – 0,23 $kgCO_2e$/EUR). Esses resultados são consistentes com os de Onat e Kucukvar (2020), que também identificaram uma predominância de emissões ocorrendo nos próprios países. Tal padrão evidencia que medidas internas - como a adoção de códigos de construção mais sustentáveis ou ambientalmente rigorosos, incentivos fiscais e investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação - possuem potencial significativo para a redução da pegada de carbono das obras de construção. A Figura 3 apresenta a distribuição das emissões conforme a localização geográfica.

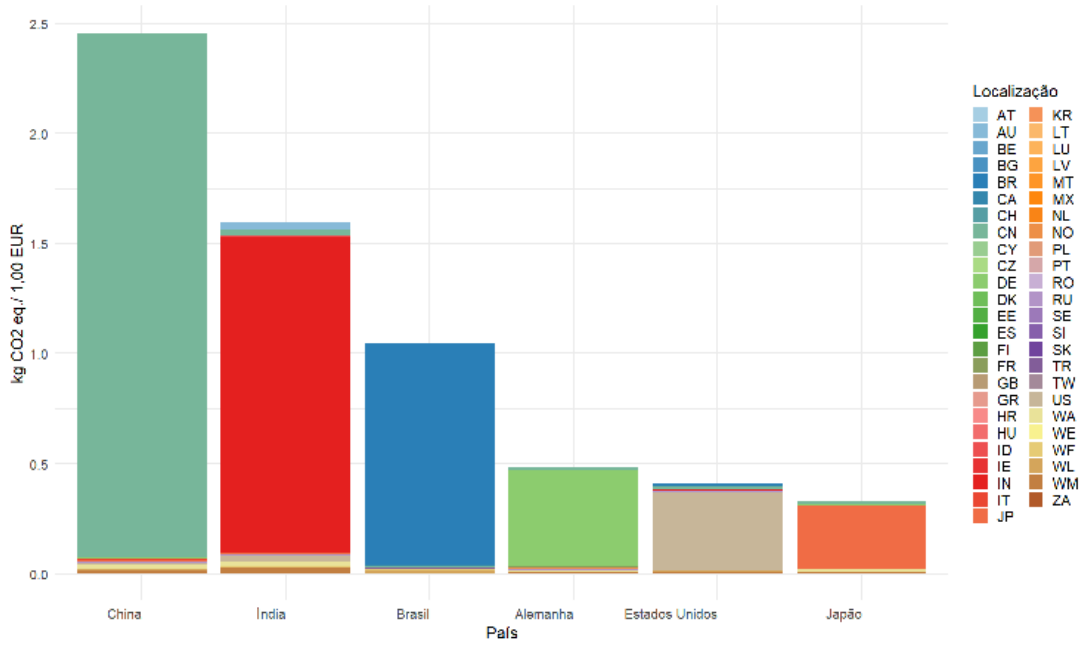

Figura 3: Emissões de dióxido de carbono equivalente de serviços de construção por país analisado e país emissor.
Fonte: os autores (2025).

No teste ANOVA realizado, o valor de p para as médias das pegadas de carbono entre os países foi de 0,0568, superior a 0,05. Isso indica que, embora haja diferenças entre as pegadas de carbono das obras de construção nos diferentes países, essas diferenças não são estatisticamente significativas. Já o teste ANOVA para os processos resultou em um valor de p de 2,6e-11, inferior a 0,05, sugerindo que há uma diferença significativa entre as emissões dos processos. Dessa forma, os processos têm um impacto mais significativo na pegada de carbono do que os países analisados.

A indústria da construção civil distingue-se das indústrias tipicamente manufatureiras por apresentar um processo produtivo dinâmico, descentralizado e predominantemente realizado *in loco*, sem a utilização de fornos industriais de alta temperatura. No entanto, apesar de não envolver diretamente processos de transformação intensivos em energia, o setor da construção civil é altamente dependente de produtos manufaturados com alta intensidade de carbono, como o cimento e o aço. Nesse contexto, a adoção de tecnologias de baixo carbono nas cadeias produtivas desses insumos - especialmente nas indústrias cimenteira e siderúrgica - constitui uma estratégia eficaz para a redução das emissões incorporadas nas obras de construção.

Tais avanços tecnológicos contribuem não apenas para a descarbonização das cadeias industriais, mas também exercem impacto significativo na mitigação da pegada de carbono do setor da construção como um todo. Ressalta-se ainda que, no Brasil, há historicamente um déficit habitacional e de infraestrutura, o que torna as obras de construção essenciais para a redução das desigualdades sociais. Isso reforça a importância da incorporação de tecnologias de baixo carbono no setor, promovendo um futuro sustentável sob os pilares econômico, social e ambiental.

Por fim, os autores destacam que este estudo contribui diretamente para o avanço dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial: o ODS 9 – Indústria, Inovação e Infraestrutura; o ODS 11 – Cidades e Comunidades Sustentáveis; e o ODS 13 – Ação Contra a Mudança Global do Clima.

5. CONCLUSÕES

As principais conclusões deste trabalho são:

- As obras de construção no Brasil – considerando emissões diretas e indiretas - resultam em uma emissão média de 0,97 $kgCO_2e$ por euro gasto com esse produto. Esse valor é inferior ao observado em países como China e Índia, porém superior ao de países como Alemanha, Estados Unidos e Japão. Apesar dessas variações, as diferenças nas pegadas de carbono entre os países analisados não se mostraram estatisticamente significativas, conforme indicado pelos resultados do teste ANOVA;
- Os principais processos emissores associados às obras de construção no Brasil são: produção de cimento e cal (0,60 $kgCO_2e$/EUR); emissões diretas do setor de construção (0,23 $kgCO_2e$/EUR); outros produtos minerais não metálicos (0,05 $kgCO_2e$/EUR); e produção de ferro, aço básico, ferroligas e seus derivados iniciais (0,05 $kgCO_2e$/EUR). Diferentemente da comparação entre países, as variações entre os processos emissores apresentaram significância estatística, conforme verificado pelo teste ANOVA;
- Diversas estratégias podem ser adotadas para mitigar as emissões de carbono ao longo do ciclo de vida das obras de construção, incluindo: implementação de tecnologias de captura de carbono em fábricas de cimento e aço, uso de hidrogênio renovável ou verde na indústria siderúrgica, eletrificação de máquinas atualmente movidas a combustíveis fósseis, e otimização de processos construtivos.

Como sugestão para estudos futuros, propõe-se a ampliação da amostra de países analisados, por exemplo, estendendo o escopo para todos os membros do G20, a fim de verificar se a ausência de significância estatística entre os países se mantém. Além disso, recomenda-se a análise de outros impactos ambientais, como eutrofização, acidificação, uso de água e consumo de energia primária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHRAE. **Documento de Posição da ASHRAE sobre Descarbonização de Edifícios**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <www.ashrae.org.>.

BARAN, E. *et al*. Quantifying Environmental Burdens of Plasters Based on Natural vs. Flue Gas Desulfurization (FGD) Gypsum. **Sustainability**, v. 13, n. 8, p. 4298, 13 abr. 2021.

BRASIL. **Projeto do MCTI quer descarbonizar construção civil por meio de edifícios com zero emissão de CO_2**. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2023/12/projeto-do-mcti-quer-descarbonizar-construcao-civil-por-meio-de-edificios-com-zero-emissao-de-co2>. Acesso em: 12 abr. 2025.

CACHOLA, C. da S. *et al*. Deploying of the carbon capture technologies for CO_2 emission mitigation in the industrial sectors. **Carbon Capture Science & Technology**, v. 7, p. 100102, jun. 2023.

CACHOLA, C. da S.; DE SOUZA, J. F. T. Cluster and regression analyses to model global emissions. **International Journal of Global Warming**, v. 34, n. 4, p. 300–313, 2024.

CACHOLA, C. da S.; PACCA, S. A. Carbon footprint of Brazilian families based on the Household Budget Survey and input-output analysis. **Ambiente & Sociedade**, v. 26, 2023.

CBIC. **PIB Brasil e Construção Civil**. Disponível em: <http://www.cbicdados.com.br/menu/pib-e-investimento/pib-brasil-e-construcao-civil>. Acesso em: 12 abr. 2025.

CECARBON. **Metodologia**. Disponível em: <https://cecarbon.com.br/methodology>. Acesso em: 12 abr. 2025.

DE SOUZA, J. F. T.; PACCA, S. A. Carbon reduction potential and costs through circular bioeconomy in the Brazilian steel industry. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 169, p. 105517, jun. 2021.

GIACOMIN, A. M.; PACCA, S. A. Input–output analysis as guidance for the Brazilian textile supply chain. **Environment, Development and Sustainability**, 30 jan. 2024.

GREEN DELTA. **About openLCA**. Disponível em: <https://www.openlca.org/about/>. Acesso em: 12 abr. 2025a.

GREEN DELTA. **openLCA Nexus: Exiobase**. Disponível em: <https://nexus.openlca.org/database/exiobase>. Acesso em: 12 abr. 2025b.

HARPPRECHT, C. *et al*. Decarbonization scenarios for the iron and steel industry in context of a sectoral carbon budget: Germany as a case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 380, 20 dez. 2022.

HUBACEK, K. *et al*. Global carbon inequality. **Energy, Ecology and Environment**, v. 2, n. 6, p. 361–369, 25 dez. 2017.

IMADA, S.; MAENO, K.; KAGAWA, S. CO_2 emission hotspots analysis on supply chains for wooden houses in Japan. **Journal of Environmental Management**, v. 353, 27 fev. 2024.

IPCC. **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 (Paola Arias *et al*., Orgs.). [S.l.: S.n.]. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>.

JONES, C. M.; KAMMEN, D. M. Quantifying Carbon Footprint Reduction Opportunities for U.S. Households and Communities. **Environmental Science & Technology**, v. 45, n. 9, p. 4088–4095, 1 maio 2011.

KIHARA, Y.; ABCP; SNIC. **Brazil: a view on the future**. Disponível em: <https://coprocessamento.org.br/wp-content/uploads/2019/09/CementReview.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2025.

LEED. **Como o LEED v4.1 trata o carbono incorporado**. Disponível em: <https://www.gbcbrasil.org.br/como-o-leed-v4-1-trata-o-carbono-incorporado/>. Acesso em: 12 abr. 2025.

ONAT, N. C.; KUCUKVAR, M. Carbon footprint of construction industry: A global review and supply chain analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 124, 1 maio 2020.

OTTELIN, J. *et al*. Comparative carbon footprint analysis of residents of wooden and non-wooden houses in Finland. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 7, p. 074006, 1 jul. 2021.

RANGANATH, S.; MCCORD, St.; SICK, V. Assessing the maturity of alternative construction materials and their potential impact on embodied carbon for single-family homes in the American Midwest. **Frontiers in Built Environment**, v. 10, 19 abr. 2024.

SANTOS, J. P. de O.; GIOVANETTI, S. E. PRODUÇÃO DE GESSO NO ARARIPE PERNAMBUCANO: IMPACTOS AMBIENTAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales**. Investigación, desarrollo y práctica, v. 12, n. 3, p. 496, 6 dez. 2019.

SIDAC. **Conteúdo técnico**. Disponível em: <https://sidac.org.br/conteudo_tecnico>. Acesso em: 12 abr. 2025.

SIMAPRO. **SimaPro Database Manual - Methods**. Disponível em: <https://simapro.com/wp-content/uploads/2020/06/DatabaseManualMethods.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2025.

SMALL WORLD CONSULTING LTD. **Multi-regional Input Output (MRIO) Emissions Factors v1.0 Comparison & Validation**. Lancaster: [S.n.].

STADLER, K. *et al*. **EXIOBASE 3: Developing a Time Series of Detailed Environmentally Extended Multi-Regional Input-Output Tables**. Journal of Industrial Ecology, v. 22, n. 3, p. 502–515, 13 jun. 2018.

STADLER, K. *et al*. **EXIOBASE 3 (3.8.2)** [Data set]. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5589597>. Acesso em: 12 abr. 2025.

STEEN-OLSEN, Kj.; WOOD, R.; HERTWICH, E. G. The Carbon Footprint of Norwegian Household Consumption 1999–2012. **Journal of Industrial Ecology**, v. 20, n. 3, p. 582–592, 14 jun. 2016.

TIKADAR, B.; SWAMI, D.; CHOWDHARY, V. Process-level emission analysis and decarbonization pathway for BF-BOF route in Indian iron and steel industry. **Journal of Environmental Management**, v. 373, 1 jan. 2025.

YAN, B.; DIETZENBACHER, E.; LOS, B. The global emission mitigation potential of avoiding waste and product lifespan extension by Chinese households. **Heliyon**, v. 10, n. 3, 15 fev. 2024.

ZEN, I. S. *et al*. Magnitudes of households' carbon footprint in Iskandar Malaysia: Policy implications for sustainable development. **Journal of Cleaner Production**, v. 315, p. 128042, set. 2021.

ZHAO, C. *et al*. Enhancing energy storage capability for renewable energy systems through advanced cement-based supercapacitors. **Energy and Buildings**, p. 115732, abr. 2025.