A INFLUÊNCIA DAS JANELAS DE ALUMÍNIO NA EMISSÃO DE CARBONO INCORPORADO DE EDIFICAÇÕES COMPLETAS[1]

CALDAS, Lucas Rosse (1)

(1) Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), lucas.caldas@fau.ufrj.br

RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar como a forma de quantificação da emissão de carbono de janelas de alumínio em um projeto de edificação pode influenciar na emissão de carbono total dessa edificação. Para isto, primeiramente foram avaliados diferentes fatores de carbono (FCs), com base no Ecoinvent e em Declarações Ambientais de Produto (DAPs). Posteriormente, foi verificada a aplicação dos FCs em um estudo de caso de um projeto real de uma edificação multifamiliar de interesse social no Brasil. Percebeu-se que o valor da mediana do Ecoinvent (690,18 kgCO2-eq/m²) é quase sete vezes superior ao das DAPs avaliadas (99,10 kgCO2-eq/m²). Desta forma, para o contexto brasileiro, em que os dados de DAPs e bancos de dados de ciclo de vida não possuem dados adaptados para o alumínio, sugere-se que para este elemento construtivo, seja desmembrado na massa de alumínio e de vidro separadamente. A partir do momento, que o setor brasileiro possuir dados que sejam representativos para as janelas utilizadas no país, sugere-se que sejam feitas novas avaliações. A presente pesquisa traz uma importante contribuição em termos da qualidade do processo de avaliação e quantificação de emissões de carbono por prever possíveis distorções de resultados, influenciando na tomada de decisão.

Palavras-chave: ACV; DAPs; Ecoinvent; Especificação; Vidro.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate how the method of quantifying carbon emissions from aluminum windows in a building project can influence the total carbon emissions of that building. For this purpose, different carbon factors (CFs) were first evaluated, based on Ecoinvent and Environmental Product Declarations (EPDs). Subsequently, the application of CFs was verified in a case study of a real project of a social interest multifamily building in Brazil. It was found that the median value of Ecoinvent (690.18 kgCO2-eq/m²) is almost seven times higher than that of the evaluated EPDs (99.10 kgCO2-eq/m²). Therefore, for the Brazilian context, where EPD and life cycle database data do not have adapted data for aluminum, it is suggested that this construction element be disaggregated into the mass of aluminum and glass separately. Once the Brazilian sector has data that are representative of the windows used in the country, it is suggested that new evaluations be carried out. This research makes an important contribution in terms of the quality of the evaluation and quantification process of carbon emissions by predicting possible result distortions, influencing decision-making.

***Keywords**: LCA; EPDs;* Ecoinvent; *Specification; Glass.*

---

[1] CALDAS, Lucas Rosse. Desempenho ambiental de projetos de edificações: a influência das janelas de alumínio na emissão de carbono incorporado de edificações completas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DO PROJETO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9., 2025, São Paulo. Anais... São Paulo: FAUUSP, 2025. p. 1-8. DOI 10.46421/sbqp.v9i.6686.

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção e edificações são responsáveis por aproximadamente 40% da emissão global de gases de efeito estufa (GEEs) ligada ao consumo de energia. (UNEP, 2024). Dado a isso, a mensuração dessa emissão de carbono no setor da arquitetura, engenharia, construção e operação (AECO) é urgente e necessária para se pensar em metas de redução e neutralidade a curto e médio prazo. Neste sentido, a metodologia de avaliação do ciclo de vida (ACV) é aceita como a principal para a mensuração e avaliação da emissão de carbono de produtos da construção, incluindo edificações completas (Melo et al., 2023; Röck *et al*., 2022).

Sabe-se que uma edificação é composta por muitos materiais de construção e sua quantificação correta e escolhas de fatores de carbono (FCs) adequados é parte essencial para se medir a emissão de carbono de uma forma confiável. No contexto europeu a publicação de declarações ambientais de produtos (DAPs) tem se tornado cada vez mais comum, sendo que alguns países já existe a obrigação por lei (Hoxha *et al*., 2025). Essas DAPs podem ser utilizados como banco de dados e FCs para estudos de emissão de carbono (Asdrubali; Grazieschi; Gandola, 2025). Por outro lado, para o contexto brasileiro, embora exista um esforço do setor, apenas alguns fabricantes de materiais (normalmente de empresas de grande porte) tem publicado suas DAPs ou estudos relacionados.

Dentre os vários materiais e produtos de construção, alguns podem exercer maior influência nos resultados de emissão de carbono, a depender da quantidade utilizada na edificação e seu FC (Melo et al., 2023). Quando se analisa os FCs de materiais de construção de forma isolada (por exemplo por massa de material), o alumínio é um dos mais elevados, devido ao elevado consumo de energia na sua produção. O vidro é outro material com um elevado FC (Hoxha *et al*., 2025). Assim, a junção desses dois materiais nos sistemas de esquadrias, especialmente janelas levarão a um elevado FC colocando as janelas como um dos produtos-chave em metas de redução de carbono das edificações.

Especialmente para o contexto brasileiro, até onde se sabe, ainda não se tem dados para janelas, apenas dos seus materiais de forma isolada. Diferentemente dos países do hemisfério norte, as janelas no Brasil são normalmente compostas de vidros de pequena espessura (normalmente 3 mm) e com apenas uma folha (Melo et al., 2023). Assim, utilizar dados descontextualizados pode levar a resultados muito fora da realidade que não servirão para a tomada de decisão (ou levarão a uma decisão totalmente equivocada).

A partir do contexto apresentado, como objetivos, a presente pesquisa se propõe: (1) avaliar e comparar fatores de carbono - FC (em kgCO2-eq/m²) de janelas de alumínio e (2) avaliar a influência do sistema de janelas de alumínio na emissão de carbono total de um projeto de edificação completa no Brasil.

A presente pesquisa traz uma importante contribuição científica no processo de avaliação e quantificação de emissões de carbono por prever possíveis distorções de resultados que podem ocorrer no processo, prejudicando a qualidade deste tipo de avaliação. Medições de carbono equivocadas levarão a tomadas de decisões inadequadas, como por exemplo, em termos de definir planos e metas de ação para redução da emissão de carbono no setor da AECO.

2 METODOLOGIA

2.1 Avaliação e comparação de fatores de carbono (FC)

Os seguintes critérios foram considerados para a escolha das DAPs das janelas de alumínio: (1) estar dentro da validade; (2) unidades declaradas = 1m²; (3) disponibilidade de dados quantitativos sobre a composição dos materiais (alumínio e vidro principalmente); (4) validade e utilizar o método EN 15804:2019 para a avaliação dos impactos ambientais. Foi baseado no estudo de Asdrubali, Grazieschi e Gandola (2025). Foram consideradas a emissão de carbono fóssil (em kgCO2-eq/m²) e as etapas de extração das matérias primas (A1), transporte (A2) e manufatura (A3). Ao final, foram selecionados 6 DAPs, correspondentes a 26 janelas. Os seguintes itens foram avaliados nas DAPs: (1) Nome Fabricante; (2) Escopo geográfico e aplicação da DAP; (3) Consumo de eletricidade para a produção da janela; (4) Quantidade de vidros; Valor U(em W/m2K); (5) Massa total da janela (em kg/m²); (6) Massa de alumínio na janela (em kg/m²); e (7) Massa de vidro na janela (em kg/m²); FC - fóssil (em kgCO2-eq/m²).

2.2 Avaliação da influência do sistema de janela de alumínio na emissão de carbono total de uma edificação

Para o cálculo do FC com a janela desmembrada foram utilizados os seguintes dados apresentados na Tabela 1. Foi considerado que para a produção da janela utiliza-se 1,27 kWh/m² (Ecoinvent Centre, 2025) e as distâncias de transporte de 500 km, um valor razoável para a realidade brasileira (Melo et al., 2023).

Tabela 1 – FCs utilizados na modelagem da janela de alumínio desmembrada

Material	Unidade	FC (kgCO2-eq/UM)	Fonte
Alumínio	kg	4,25	ABAL - Associação Brasileira do Alumínio (2017)
Vidro	kg	0,99	EPD Cebrace
Energia elétrica	kWh	0,17	Ecoinvent v.3.8
Transporte rodoviário	t.km	0,14	Ecoinvent v.3.8

Fonte: Autor (2025)

A edificação avaliada como estudo de caso é do tipo HIS, tem quatro pavimentos tipo, área construída de aproximadamente 9.500 m², considerando os seguintes sistemas: fundação, estrutura, cobertura, acabamento, instalações e esquadrias (janelas e portas). O consumo de materiais foi obtido via orçamento e foram utilizados FCs de DAPs e do Ecoinvent v. 3.8. Seguiu-se a seguinte ordem de prioridade para escolha dos FCs: DAPs com escopo do Brasil, DAPs com escopo global e Ecoinvent v.

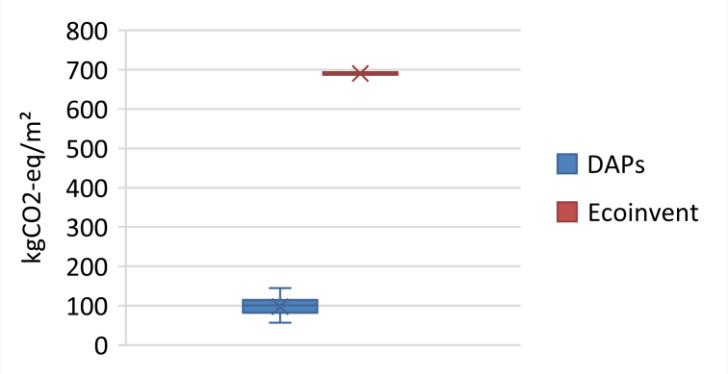
3.8.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Avaliação e comparação de fatores de carbono (FC)

Na Figura 1 é apresentada a comparação dos FCs avaliados utilizando dado do Ecoinvent e DAPs. Percebe-se que o valor da mediana do Ecoinvent (690,18 kgCO2-eq/m²) é quase sete vezes superior ao das DAPs avaliadas (99,10 kgCO2-eq/m²), mostrando a importância se atentar para a escolha do FC mais adequado para a janela de alumínio. Para o dado do Ecoinvent é especificado um valor U de 1,6 W/m².K, enquanto para os DAPs valores U que variam de 1,2 a 3,2 W/m².K. Normalmente quanto menor o menor valor de U (menor transmissão de calor), maior é o FC, devido ao maior consumo de materiais para compor a janela. É importante ressaltar que não foi encontrada nenhuma DAP brasileira, surgindo o questionamento se é adequado utilizar esses FCs para avaliação de carbono para edificações completas brasileiras. Para o Brasil, é comum encontrar janelas com valores de U superiores a 5,0 W/m².K (Lamberts, s.d), ou seja, janelas muito mais simples.

Figura 1 – Comparação Fatores de Carbono (FCs) obtidos via Declarações Ambientais de Produto (DAPs) e Ecoinvent de janelas de alumínio

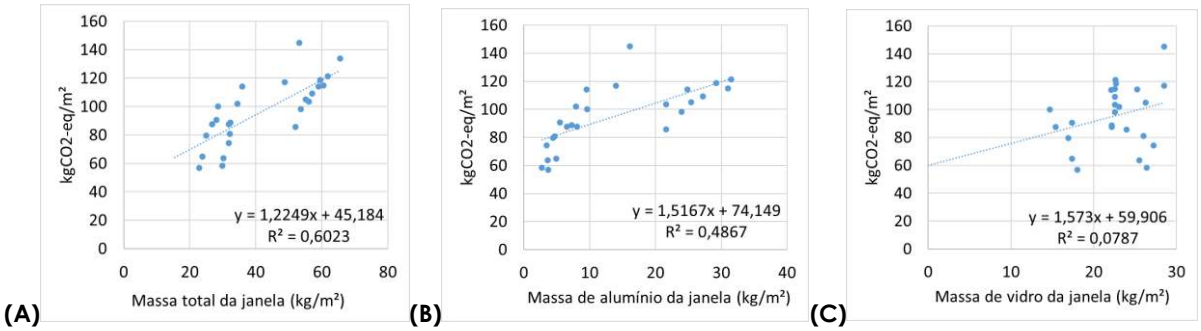


Fonte: Autor (2025)

Para os dados do Ecoinvent, a maior contribuição da emissão de carbono ocorre para a produção da liga de alumínio, chegando a mais de 80%. Para as DAPs, a produção de alumínio primário é a etapa mais dominante, especialmente a produção de alumina e a eletrólise. A produção de lingotes reciclados, que apresenta um impacto muito menor do que a produção de lingotes primários, é usada no Módulo A1-A3 para a fração de alumínio proveniente da reciclagem. O processo de extrusão que converte lingotes, ou seja, tarugos, em perfil é muito menos significativo.

Na Figura 2 são apresentadas a correlação entre a massa total da janela, massa de alumínio da janela e massa de vidro da janela (todas em kg/m²) com os FCs (em kgCO2-eq/m ²) para a fabricação das janelas.

Figura 2 – Correlação entre a massa total da janela, massa de alumínio da janela e massa de vidro da janela (todas em kg/m²) com os FCs com base nas DAPs (em kgCO2-eq/m ²)



Fonte: Autor (2025)

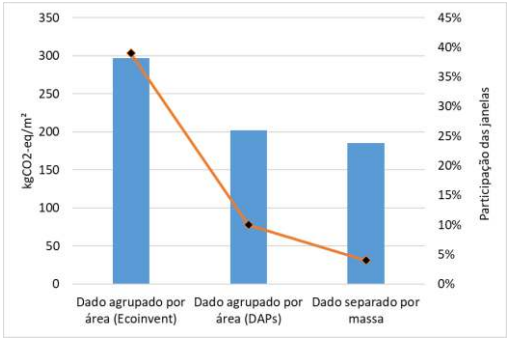
A relação entre a massa total das janelas e massa de alumínio e os FCs foram as únicas variáveis que tiveram uma correlação aceitável (R^2 = 0,6023 e R^2 = 0,4867, respetivamente), quando apenas os dados de DAPs são considerados. A massa de vidro da janela apresentou uma correlação muito baixa (R^2 = 0,0787). A massa total foi melhor que massa de alumínio, sugerindo que além desses dois materiais (alumínio e vidro), outros componentes e o país onde a janela é fabricada têm uma influência importante na emissão de carbono.

Se os dados do Ecoinvent são avaliados de forma conjunta o valor do R^2 vai para 0,01 para todos os casos. Essa discrepância sugere que os dados do Ecoinvent precisam ser revistos, pois são valores muito elevados. Provavelmente, um dos motivos para valores tão elevados é o fato de terem sido considerados processos obsoletos que consomem grande quantidade de energia para a obtenção do alumínio primário e na fabricação da janela.

3.2 Avaliação da influência do sistema de janelas na emissão de carbono total de uma edificação

Quando valores medianos dos FCs são empregados na modelagem da emissão de carbono total de uma edificação completa de uma edificação de 4 pavimentos, do tipo HIS, são verificados os valores de participação das janelas (considerando o vidro e o alumínio) apresentados na Figura 3.

Figura 3 – Emissão de carbono da edificação completa (colunas em azul) e participação do sistema de janelas (linha vermelha com losangos pretos)



Fonte: Autor (2025)

Percebe-se que apenas mudando FC da janela de alumínio a emissão total de carbono da edificação pode variar de 185 kgCO2-eq/m² (dados com FC da janela desmembrada) para aproximadamente 300 kgCO2-eq/m² (dado com FC agrupado por m² de janela obtido via Ecoinvent). Os valores encontrados estão dentro do esperado, em termos de ordem de grandeza. Melo *et al.* (2023) encontraram em torno de 330 kgCO2-eq/m² para emissão de carbono incorporada de HIS brasileiras. A participação do sistema de janelas sai de 5% para quase 40%. Melo *et al.* (2023) encontraram valores da participação das esquadrias (que considera portas e janelas) de 10 a 15% e Medeiros *et al.* (2018) inferior a10%. Portanto, percebe-se que a escolha desse FC pode ser bastante crítica para um estudo de avaliação de carbono de uma edificação completa. Os dados obtidos via DAPs leva a um FC quase sete vezes menor que o FC do Ecoinvent e o menor de todos foi quando os dados são desmembrados principalmente considerando a massa de alumínio e vidro da janela.

Desta forma, para o contexto brasileiro, recomenda-se que até ser publicada uma DAP específica para as janelas produzidas aqui, que a modelagem das janelas de alumínio seja realizada de forma desmembrada, em termos principalmente da massa da caixilharia de alumínio e dos vidros. Especialmente para o caso brasileiro, o alumínio produzido no Brasil tem uma pegada de carbono (considerando a cadeia de valor) até 50% inferior (4,25 kgCO2-eq/kg enquanto a média mundial de 9,64 kgCO2-eq/kg), chegando a mais de 10 kgCO2-eq/kg para o contexto europeu (Hoxha *et al*., 2025), devido principalmente à alta participação de fontes renováveis na matriz elétrica e altas taxas de reciclagem no processo de produção, segundo dados da Associação Brasileira do Alumínio (ABAL, 2017). Na cadeia de alumínio, aproximadamente 50% da emissão de carbono vai para a produção do alumínio primário, 26% para a produção da alumina, 12% da energia elétrica utilizada na redução e o restante para outros processos envolvidos (anodo, extração da bauxita, transportes, lingotamento, etc.), segundo dados da ABAL (2017). Na produção de alumínio primário a maior parcela das emissões de carbono vai para a produção de alumina e o processo de eletrolise, que consome grandes quantidades de energia elétrica.

Para o caso dos vidros, a pegada de carbono do vidro plano brasileiro foi considerada como 0,99 kgCO2-eq/kg (segundo um EPD da Saint-Gobain) enquanto a média mundial é 1,34 kgCO2-eq/kg (EC3, 2025) e pode chegar a quase 3,0 kgCO2-eq/kg em fabricantes europeus (Hoxha *et al*., 2025), ou seja, uma diferença que pode ser três vezes superior. Somado a isso, normalmente no país se usa janelas com vidros simples e com espessuras bastante reduzidas (por exemplo 3 mm) principalmente para projetos de HIS, que também irá resultar em menores valores de FCs para as janelas de alumínio. Para a maioria das DAPs avaliadas (a sua grande maioria com escopo voltado para o contexto europeu) são empregadas janelas com vidros duplos ou triplos e espessuras muitas vezes superiores a 10 mm.

Desta forma, pelo fato de o alumínio e o vidro brasileiro terem uma menor pegada de carbono (quando comparados com a média mundial), somada ao fato dos vidros normalmente empregados nas janelas brasileiras terem apenas uma camada e com menores espessuras, é de se esperar menores FCs das janelas de alumínio. Fazendo uma estimativa rápida, considerando um processo inverso, para se ter resultados próximos ao menor valor da emissão de carbono da edificação apresentado na

Figura 3 (185 kgCO2-eq/m²), a janela de alumínio teria que ter um FC de 40 kgCO2-eq/m², que corresponde a aproximadamente 40% do valor encontrado para os dados obtidos nas DAPs (99,10 kgCO2-eq/m²).

Conclui-se assim a urgência dos fabricantes brasileiros façam estudos específicos para janelas produzidas no país, seja na forma de DAPs ou para plataformas nacionais, como o Sistema de Avaliação de Desempenho Ambiental da Construção (Sidac). O Sidac é um sistema que foi pensado para diferentes fabricantes brasileiros de materiais de construção publicarem seus fatores de carbono e energia incorporada (Belizário-Silva *et al*., 2023). Como são indicadores ambientais simples, é um processo mais fácil e de menor custo do que o desenvolvimento de uma DAP.

Essas diferenças podem levar a tomadas de decisão totalmente equivocadas. Por exemplo, na definição de um plano setorial de redução de emissão de carbono, onde se selecionem os principais materiais que precisam receber atenção dos projetistas e construtores (de forma similar a uma curva ABC de carbono). O valor de 40% é superior aos sistemas de estruturas, vedações e acabamentos que normalmente são os mais impactantes na emissão de carbono total de edificações completas (Melo et al., 2023; Medeiros *et al*., 2018; Röck *et al*., 2022).

4 CONCLUSÕES

Sugere-se com base nos achados desta pesquisa que nos estudos de avaliação de emissão de carbono de edificações completas para o contexto brasileiro, os elementos de janelas, principalmente janelas de alumínio, sejam quantificados de forma desmembrados entre a caixilharia e os vidros, pois se não, podem levar a resultados muito superior ao do real, tendo em vista principalmente a diferença no FC do alumínio e do vidro brasileiro e de outros países (devido principalmente à matriz de energia elétrica). Foram verificados valores muito elevados para o Ecoinvent, que provavelmente pode ser explicado pela desatualização do dado, sugerindo então evitar o uso dessa base de dados para as janelas de alumínio. Adicionalmente, as DAPs existentes de janelas de alumínio normalmente retratam a realidade de países europeus, com vidros duplos ou até triplos, levando a impactos bastante superiores à realidade brasileira.

Espera-se que a presente pesquisa sirva de incentivo para que mais fabricantes de materiais de construção realizem estudos de desempenho ambiental de seus produtos, seja via DAPs ou ferramentas já disponíveis no contexto brasileiro, como ó o caso do Sidac. Finalmente, sirva de alerta para a importância de se atentar para a contabilização da janela nos estudos de emissão de carbono de edificações completas.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, à CAPES e FAPERJ, pelo apoio recebido.

REFERÊNCIAS

MELO, P.; CALDAS, L. R.; MASERA, G.; PITTAU, F. The potential of carbon storage in bio-based solutions to mitigate the climate impact of social housing development in Brazil. Journal of Cleaner Production, 433, 25, 139862, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139862.

ABAL. **A sustentabilidade da indústria brasileira do alumínio**. Confederação Nacional da Indústria, Associação Brasileira do Alumínio – Brasília: CNI, 60 p. 2017. Disponível em: <https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/94/ed/94ed618b-82f9-46af-be51-2c23d34ca4c6/abal.pdf?utm_medium=website&utm_source=archdaily.com.br>.

ASDRUBALI, F.; GRAZIESCHI, G.; GANDOLA,D.M. The Role of Environmental Product Declarations in the Decarbonization of Building Materials and Components. **Energies,** v. 18, p.1308, 2025. doi: https://doi.org/ 10.3390/en18051308

BELIZARIO-SILVA, F.; OLIVEIRA, L. S.; DA COSTA D. R.; GOMES, G.P.T.; MARINHO, A. C.; DEGANI, C. M.; CALDAS, L. R.; PUNHAGUI, K. R.; PACCA, S. A.; JOHN, V. M. The Sidac system: Streamlining the assessment of the embodied energy and CO2 of Brazilian construction products. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 421, p. 138461,out. 2023. doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138461.

EC3. **Embodied Carbon in Construction Calculator (EC3) Tool:** Find & Compare Materials, 2025. Disponível em: < https://buildingtransparency.org/ec3/material-search>. Acesso em: 10 fev. 2025.

ECOINVENT CENTRE. **Ecoinvent Database** v3.8. Dataset: "Window frame, aluminium, U=1.6 W/m2K {RoW}| production | Cut-off, U." 2025. Disponível em: http://www.ecoinvent.org. Acesso em: 12 jan. 2025.

HOXHA, E.; BIRGISDOTTIR, H.; RÖCK, M. Climate IMPACT of EU building materials: Data compilation and statistical analysis of global warming potential in environmental product declarations. **Sustainable Production and Consumption**, Elsevier, v. 54, mar. 2025. doi: https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.12.015.

LAMBERTS, R. **Desempenho Térmico de edificações Aula 10: Eficiência energética em janelas.** Notas de Aula. Disponível em: < https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/Aula-Desempenho%20termico%20janelas.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2025.

MEDEIROS, L. M.; DURANTE, L. C.; CALLEJAS, I, J. A. Contribuição para a avaliação de ciclo de vida na quantificação de impactos ambientais de sistemas construtivos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 365-385, abr./jun. 2018. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000200259

MELO, P.; CALDAS, L. R.; MASERA, G.; PITTAU, F. The potential of carbon storage in bio-based solutions to mitigate the climate impact of social housing development in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, 433, 25, 139862, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139862.

RÖCK, M.; SØRENSEN, A.; TOZA, B.; STEINMANN, J.; HORUP, L. H.; LE DEN, X.; & HARPA BIRGISDOTTIR, H. **Towards EU embodied carbon benchmarks for buildings – Setting the baseline: A bottom-up approach**. 1–49. 2022. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.5895051.

UNEP - United Nations Environment Programme; YALE CENTER FOR ECOSYSTEMS + ARCHITECTURE. **Building Materials and the Climate:** Constructing a New Future. Acessado 13 Dez 2024 <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/43293.