ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

Avaliação de emissões de carbono: análise comparativa entre dados de projeto e de obra nas etapas de fundação e estrutura

Carbon emissions assessment: comparative analysis between design and construction data for the foundation and structure stages

Marcella Clarimundo Ferreira Silva
Universidade de Brasília - UnB | Brasília | Brasil | maclarimundofs@gmail.com
Lucas Rosse Caldas
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ | Rio de Janeiro | Brasil | lucas.caldas@fau.ufrj.br
Chenia Rocha Figueiredo
Universidade de Brasília - UnB | Brasília | Brasil | Chenia@unb.br

Resumo

Este estudo investiga as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEEs) embutidas (EE) provenientes das etapas de fundação e estrutura, abrangendo desde a extração da matéria-prima (berço) até a produção dos materiais (portão) utilizados na construção de uma edificação residencial localizada em Brasília - DF. Para tanto, foi utilizada a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) alimentada com dados reais originários, inicialmente do projeto e posteriormente do canteiro de obras. Foram empregados dados do Ecoinvent, Declarações Ambientais de Produtos (DAPs) e do Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (Sidac). Como resultados, verificou-se que a maior parte das emissões é proveniente da produção de concreto e aço. Observou-se uma diferença de até 15% quando são utilizados dados de consumo efetivo dos materiais de obra em relação ao orçamento do projeto. A pesquisa contribui cientificamente ao quantificar as EC da etapa de fundação, que normalmente é excluída nos estudos de ACV, e ao utilizar dados reais considerando o consumo efetivo de materiais, apresentando métricas para auxiliar na definição de futuros benchmarks de carbono para edificações brasileiras.

Palavras-chave: Carbono Embutido. ACV. Consumo efetivo. Emissões de GEE.

Abstract

This study investigates the Embodied Greenhouse Gas Emissions (EE), encompassing from the material manufacturing (cradle) phase to the production of materials (gate), used in a construction project, addressing the foundation and structure stages of a residential building

Como citar:
SILVA, M. C. F., CALDAS, L. R., FIGUEIREDO, C. R. Avaliação de emissões de carbono: análise comparativa entre dados de projeto e de obra nas etapas de fundação e estrutura. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

located in Brasilia - DF. To accomplish this analysis, the Life Cycle Assessment (LCA) method was applied, utilizing real data originating from the project and from the construction site, comparing both sources. Data from Ecoinvent, Environmental Product Declarations (EPDs), and the Construction Environmental Performance Information System (Sidac) were also used. The results revealed that the majority of emissions stem from concrete and steel production. A difference of up to 15% in emissions was observed when comparing actual material consumption data from the construction site to the project estimates. This research seeks to contribute scientifically by quantifying the EE of the foundation stage, which is typically excluded in LCA studies, and by drawing from real data, considering actual material consumption, and presenting metrics to assist in defining future carbon benchmarks for Brazilian buildings.

Keywords: Embodied Carbon. LCA. Real Consumption. GHG Emissions.

INTRODUÇÃO

As emissões globais de gases de efeito estufa (GEEs) continuam a aumentar, mantendo sua trajetória ascendente impulsionada por práticas insustentáveis de padrões de consumo, uso de energia, uso da terra e mudanças no uso do solo. Entre 2019 e 2023, houve um aumento de aproximadamente 900 Mt nas emissões vinculadas à energia em todo o mundo. Em relação às emissões globais advindas das edificações, o aumento foi de 50% entre 1990 e 2019 [1,2].

Atualmente, a demanda energética e as emissões do setor de edificações e construção são responsáveis por 21% das emissões de GEE. Mesmo reduzindo em 3,5% a intensidade energética do setor, em 2022, houve um aumento de 1% em suas emissões, totalizando 37% das emissões globais de CO_2 relacionadas à energia e processos e 34% da demanda energética global, atingindo assim um novo recorde. Destrinchando a participação dos edifícios nas emissões globais de energia e processos em 2022, as emissões referentes à fabricação do aço, alumínio e concreto empregados na construção de edificações totalizam cerca de 2,3 $GtCO_2$, mais de 6% das emissões globais. Para a produção de outros materiais construtivos como vidro e tijolo, estima-se entre 2% e 4%, aproximadamente 1,2 $GtCO_2$ emitidos. Já o transporte e outras indústrias do setor totalizam 63% das emissões [3].

A urgência em reduzir os impactos ambientais provenientes da construção e a necessidade de adaptar as edificações para os efeitos e consequências das mudanças climáticas são inegáveis. Ações de mitigação bem orquestradas e verdadeiramente implementadas no setor da construção e edificação representam um enorme potencial para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, indo além do ODS 13 e contribuindo para outras 15 ODS [1,4].

Com pesquisas focadas nas emissões operacionais (EO), as edificações têm-se tornado mais eficientes em termos energéticos, reduzindo suas EOs [5,6,7,8]. Entretanto, já é possível afirmar que as emissões embutidas (EE), provenientes da fabricação, transporte, construção, manutenção e fim de vida da edificação, já chegam a representar até 40-50% das emissões de CO_2 de todo o ciclo de vida de uma edificação, sendo cerca de 30% dessas EEs associadas ao processo inicial de construção, atingindo a atmosfera desde o início da ativação do canteiro de obras [6,7,9,10].

Tendo em vista que a tendência para as EEs é continuar aumentando e ciente de que a fabricação dos materiais é a grande fonte de emissões de GEE na construção de edificações, pesquisadores têm voltado seus estudos para a redução do carbono incorporado dos edifícios, analisando não só estratégias aplicadas às edificações, mas também ao setor da indústria da construção [4,8,9,11].

No Brasil, as emissões de CO_2, CH_4 e N_2O têm seguido uma tendência crescente similar à de 1990. Em um ranking global, o Brasil aparece em 6° lugar entre os maiores emissores, contribuindo com 3% das emissões em 2022. Desse total, as edificações representam 6% das emissões brasileiras, cerca de 29,9 $MtCO_2eq$, no entanto, sem contabilizar as emissões provenientes da produção dos materiais de construção [12,13].

Inserido no contexto de urgência em alcançar a neutralidade do carbono no ciclo de vida das edificações, esse estudo tem como objetivo analisar as EEs de uma edificação residencial brasileira localizada no bairro Noroeste em Brasília, Distrito Federal. Para acessar o impacto ambiental relacionado às EEs referentes à construção dessa edificação, optou-se pela metodologia de ACV com inputs baseados em um quantitativo de materiais reais originários do próprio canteiro de obras do estudo de caso em comparação a dados de projeto. Foram avaliados os sistemas de estrutura e fundação da edificação e utilizados diferentes bancos de dados. Esse estudo contribui cientificamente por quantificar as EEs da etapa de fundação, que normalmente é excluída nos estudos de ACV, e por utilizar dados reais, considerando o consumo efetivo de materiais. Finalmente, apresenta métricas mais confiáveis para auxiliar na definição de futuros benchmarks de carbono para edificações brasileiras.

Método

O pensamento de ciclo de vida é apoiado pela ACV, uma metodologia com abordagem científica e internacionalmente padronizada pela ISO 14040 e 14044, que apresentam os princípios, estrutura, diretrizes e requisitos para avaliação do impacto ambiental de produtos [7,14,15]. No Brasil, a NBR ISO 14040 detalha a metodologia para a condução de uma ACV, centrando-se nos aspectos ambientais e possíveis impactos desde a extração da matéria-prima até sua disposição final [14].

Para a condução de uma ACV, é crucial entender e delimitar as fronteiras abordadas no estudo. Essa abordagem pode ser completa, do "berço ao berço" quando se trata de sistemas que adotam reciclagem ou reutilização, do "berço ao túmulo" indo da extração da matéria-prima à destinação final, do "berço ao portão" abrangendo da extração ao processo de fabricação do material, ou do "portão ao portão" referente ao processo interno da indústria [16].

Em uma perspectiva internacional, a norma europeia EN 15978 é regida pela ACV e apresenta a metodologia voltada para a avaliação do desempenho ambiental de edificações. Essa normativa traz os estágios considerados no ciclo de vida de uma edificação, produto, construção, uso e manutenção, fim de vida e estágio além do ciclo

de vida da edificação, e seus respectivos módulos, que descrevem as etapas ativas em cada estágio [17].

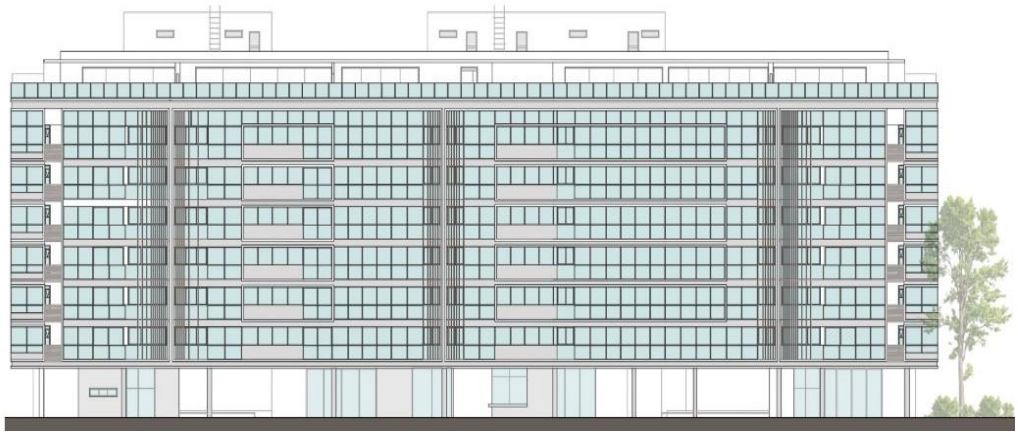
Embora a ACV seja uma metodologia essencial para acessar potenciais impactos ambientais, traçar estratégias em concordância com o Acordo de Paris e os alarmantes relatórios climáticos, e implementar políticas para uma indústria sustentável, sua aplicação no setor da construção civil ainda encontra limitações. A falta de cooperação do setor na concessão de dados reais, como o quantitativo e descrição dos materiais empregados que permitiriam uma análise realista, e o ainda escasso banco de dados com Declarações Ambientais de Produtos (DAPs) brasileiros são alguns dos fatores que limitam os estudos de ACV no Brasil.

Diante do exposto, essa pesquisa seguiu o processo metodológico apresentado na NBR ISO 14040, EN 15978 e EN 15804:2012+A2, respeitando as quatro fases para aplicação da ACV [14,17,18]. Visando acessar as emissões reais, buscou-se a colaboração do setor da construção para alimentar o estudo com quantitativos reais de matérias referentes à fundação e à estrutura.

OBJETIVO, ESCOPO E UNIDADE DECLARADA

Visando avaliar as EE de GEEs provenientes da etapa de fundação e estrutura, buscou-se uma edificação cuja construtora concedesse os dados necessários para a realização da ACV com inputs reais (material efetivamente consumido na obra). Sendo assim, uma edificação residencial multifamiliar localizada no Setor Noroeste, Brasília - Distrito Federal, foi escolhida como estudo de caso, **Figura 1**. Mediante a colaboração da construtora e devido ao canteiro de obras ainda estar ativo no início deste estudo, foi possível coletar o quantitativo real de materiais efetivamente empregados nas etapas abrangidas, bem como o quantitativo prévio do projeto.

Figura 1 - Fachada Frontal da edificação em estudo.



Fonte: Autores, adaptado do projeto original (2024).

A tipologia dessa edificação é a mesma empregada nas superquadras de Brasília e comumente encontrada no bairro Noroeste. É composta por 6 pavimentos sobre pilotis e está implantada em um terreno de 1.500 m². No bairro, existem outras 10 glebas com essa dimensão destinadas à mesma tipologia. O **Quadro 1** apresenta as principais características da edificação.

Quadro 1 - Características da edificação em estudo.

Área total do terreno	1.500 m²
Número de pavimentos	6 pavimentos + Térreo em pilotis
Cota de coroamento	31 metros
Área total da edificação	14.203,67 m²

Fonte: Dados concedidos pela construtora (2024).

A aplicação da ACV neste estudo tem como objetivo contribuir cientificamente para a quantificação das emissões embutidas (EEs) das etapas de fundação e estrutura da edificação, com base no orçamento prévio do projeto e no consumo real de materiais no canteiro de obras. Além disso, colabora com o cálculo das emissões da etapa de fundação, frequentemente negligenciada em outros estudos.

Essa pesquisa limita-se ao Estágio de Produto para as etapas de fundação e estrutura, abrangendo o módulo A1 (extração da matéria-prima), A2 (transporte) e A3 (fabricação dos produtos), conforme descrito na norma EN 15978:2011, adotando uma abordagem do "berço ao portão" e analisando as emissões embutidas de carbono. Ademais, o estudo se concentrou nos principais materiais empregados em cada etapa, sendo estes o concreto Fck 40 MPa, aço CA-50, brita e madeira compensada utilizada nas formas de pilares, lajes e vigas.

A Unidade Declarada utilizada para a comparação dos resultados é de 1 m² de área construída. Para a vida útil do projeto (VUP), foi adotado um período de 50 anos, em concordância com os valores apresentados pela ASBEA (2015) e outros estudos da literatura [7,19,20].

O **Quadro 2** apresenta um resumo das principais informações para a condução da ACV nesta pesquisa, elucidando a Fase I da norma ISO 14040:2009.

Quadro 2 - Informações para condução da ACV nesse estudo.

Fase I da ACV	
Metodologia de avaliação	NBR 14.040, apoiada pela EN 15.978
Estágios do ciclo de vida abrangidos	Estágio de produto: A1 – A3, berço ao portão
Partes analisadas da edificação	Etapa de Fundação e Estrutura
Método de quantificação dos materiais	Organização do quantitativo de materiais do orçamento prévio e do controle de matérias do canteiro de obras concedidos para construtora.
Bases de dados utilizadas	Ecoinvent, DAP, SIDAC. Utilizando preferencialmente dados Brasileiros.
Software utilizado para ICV	Microsoft Excel
Vida útil do edifício	50 anos (ASBEA, 2015; NBR 15.575, 2013)
Público-alvo	Pesquisadores, projetistas, formadores de políticas públicas.
Unidade Declarada	1m² de área construída
Categorias de Impacto Selecionadas	Mudanças Climáticas (*PAG: potencial de Aquecimento Glogal*) em $KgCO_2eq$. Emissões de CO_2 em $kgCO_2$.

Fonte: Autores (2024).

Com os resultados desta ACV, pretende-se contribuir para a busca da neutralidade do carbono no ciclo de vida das edificações, reduzir as emissões do setor da construção civil e promover a conscientização sobre a melhor gestão do volume de materiais consumidos pelo setor. Por ser conduzida pela ACV, uma metodologia de suporte à tomada de decisões, esta avaliação é voltada para a academia e para profissionais das áreas de construção civil, sustentabilidade, economia circular e mudanças climáticas.

ANÁLISE DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

A modelagem do inventário do ciclo de vida (ICV) foi realizada no Excel, com a alocação dos materiais e seus respectivos quantitativos divididos entre os Dados de Projeto, provenientes do orçamento prévio da edificação, e os Dados de Obra, referentes à quantidade real utilizada no canteiro de obras. Esses dados foram segregados entre as etapas de fundação e estrutura.

Para a etapa de fundação, foram considerados o concreto Fck 40 MPa, o aço CA-50 e a brita, empregados nas sapatas e vigas baldrames. Na etapa de estrutura, foram quantificados o concreto Fck 40 MPa, o aço CA-50, a brita e a madeira compensada para formas, abrangendo lajes, capitéis, pilares, vigas, escadas, poços de elevadores, cortinas de concreto e rampas. A **Tabela *1*** apresenta os quantitativos mencionados.

Tabela 1 - ICV: Quantitativo de materiais da edificação em estudo.

Etapa	Material	Dados de Projeto	Dados de Obra	Und.
Fundação	Concreto Fck 40MPA	538,75	984,50	m³
	Aço CA-50	37.611,30	38.180,40	Kg
		37,61	38,18	Ton.
	Brita	121.624,00	662.262,00	Kg
Estrutura	Concreto Fck 40MPA	5.078,02	5.611,00	m³
	Aço CA-50	492.401,59	498.197,83	Kg
		492,40	498,20	Ton.
	Brita	8.473.660,00	9.285.445,00	Kg
	Madeira Compensada	484,4 4	501,25	m³

Fonte: Dados concedidos pela construtora (2024).

A **Tabela 2** mostra os fatores de impacto utilizados para cada material, limitados aos estágios de produto A1, A2 e A3, conforme definido no escopo, e a fonte de cada fator. Para a escolha dos fatores EE, deu-se preferência a dados brasileiros ou Declarações Ambientais de Produtos (DAPs) dos fornecedores da obra, com base na categoria de impacto de Potencial de Aquecimento Global (PAG em $kgCO_2$-eq). Quando disponíveis, também foram utilizados DAPs dos próprios fornecedores da obra.

Como análise adicional, foram utilizados dados da plataforma brasileira Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (SIDAC), que fornece informações sobre emissões de CO_2 em $kgCO_2$ (sem considerar outros gases de efeito estufa, como metano e óxido nitroso). Para o presente trabalho, todos os resultados foram apresentados em $kgCO_2$-eq.

Tabela 2 - ICV: Fatores de EE empregados na modelagem.

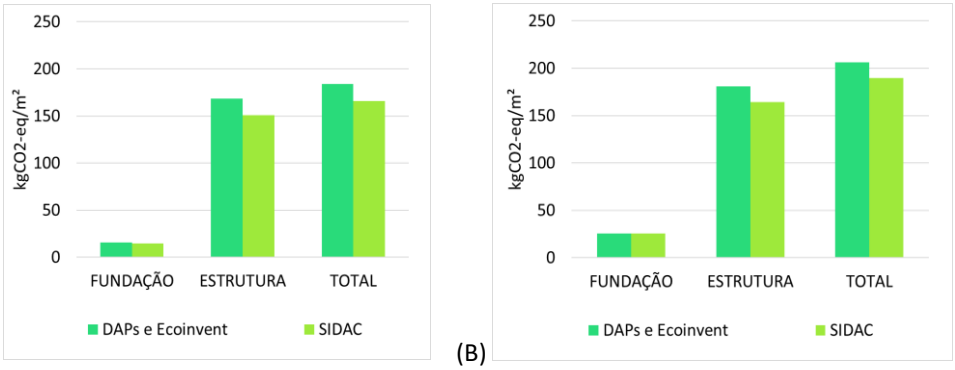
	Material Construtivo	Fator de Impacto	Und.	Fonte
Mudanças Climáticas	Concreto Fck40 MPa	305,00	$kgCO_2$-eq/m³	DAP Votorantim BR 2023
	Aço CA-50	1,62	$kgCO_2$-eq/kg.	DAP AcelorMittal BR 2019
	Brita	0,00 503	$kgCO_2$-eq/kg	Ecoinvent BR 2023
	Madeira compensada	2,20	$kgCO_2$-eq/m³	Ecoinvent 2023
Emissões de CO_2	Concreto Fck 40 MPa	339,45	$kgCO_2$/m³	SIDAC
	Aço CA-50	0,74	$kgCO_2$/kg	SIDAC
	Brita	0,00467	$kgCO_2$/kg	SIDAC
	Madeira compensada	29,38	$kgCO_2$/m³	SIDAC

Fonte: Os autores (2024).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

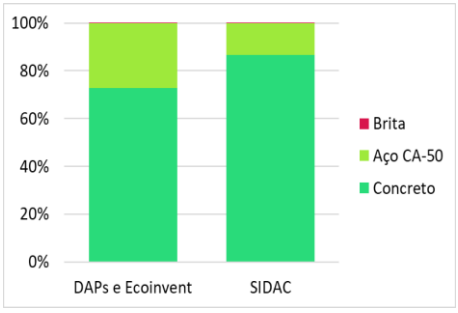
Nesta seção, são apresentados os resultados da pesquisa nas **Figuras 2, 3 e 4**. Primeiramente, são exibidos os valores de emissões embutidas (EE) em $kgCO_2$-eq/m² e, posteriormente, a contribuição de cada material em cada elemento (fundação e estrutura).

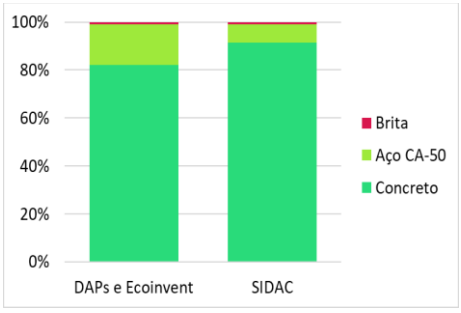
Figura 2 - Comparativo dos resutados em kgCO2-eq/m² de EE por etapa e total considerando os diferentes dados. (A) Dados de projeto. (B) Dados de obra.



Fonte: Os autores (2024).

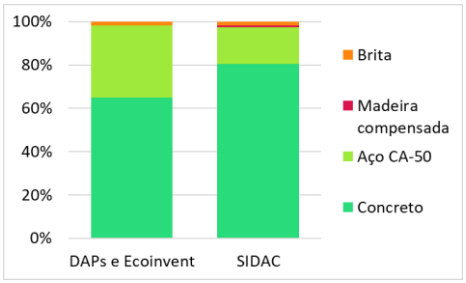
Figura 3 - Comparativo da participação em EE dos materiais no elemento de fundação. (A) Dados de projeto. (B) Dados de obra.

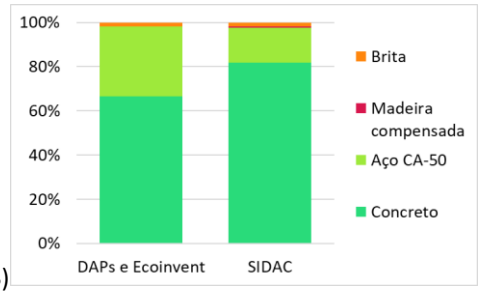
(A) 

(B) 

Fonte: Os autores (2024).

Figura 4 - Comparativo da participação em EE dos materiais no elemento de estrtura. (A) Dados de projeto. (B) Dados de obra.

(A) 

(B) 

Fonte: Os autores (2024).

As EEs variaram de 165,67 $kgCO_2$-eq/m² (SIDAC) a 184,18 $kgCO_2$-eq/m² (DAPs e Ecoinvent) para os Dados de Projeto, e de 189,87 $kgCO_2$-eq/m² (SIDAC) a 206,40 $kgCO_2$-eq/m² (DAPs e Ecoinvent) para os Dados de Obra. Essas faixas de valores estão em conformidade com a literatura científica. De acordo com o Benchmark do LETI (2020), o valor médio das EE para edificações é de 275 $kgCO_2$-eq/m² em análises que consideram os estágios A1-A3 (variando de 210 a 368 $kgCO_2$-eq/m²) [20]. Röck et al. (2022) avaliaram edificações europeias e encontraram valores médios de 300 $kgCO_2$-eq/m² [22]. Comparando os resultados deste estudo com esses dados, as EE dos estágios A1-A3 estão abaixo da média. No entanto, é importante ressaltar que apenas a estrutura e as fundações foram avaliadas neste estudo, e o valor aumentará quando outros elementos da edificação forem contabilizados (vedações, revestimentos, etc.). Outra diferença é que, nesses estudos, foram utilizados dados de projeto e não dados de obra.

Frischknecht et al. (2020) analisaram uma edificação residencial de 12 pavimentos, empregando dados oriundos de 17 países nos estágios A1-A3, e, no âmbito brasileiro, obtiveram 500 $kgCO_2$-eq/m² [20]. Nesta pesquisa, a etapa de fundação alcançou 25,73 $kgCO_2$-eq/m² com Dados da Obra, valor abaixo da média apresentada pelos autores de 62,41 $kgCO_2$-eq/m². A etapa de estrutura atingiu 180,67 $kgCO_2$-eq/m² com Dados da Obra neste estudo, ultrapassando a média de 167,54 $kgCO_2$-eq/m² obtida pelos autores. Melo et al. (2023) encontraram valores variando de 270 a 390 $kgCO_2$-eq/m² para edificações brasileiras, sendo que a fundação não foi avaliada por falta de dados [23].

Quando comparados os resultados com os dados da obra e do projeto, observa-se um aumento da EE total variando de 12% (DAPs e Ecoinvent) a 15% (SIDAC), o que pode ser considerado significativo. Quando os elementos são avaliados separadamente, a diferença na fundação varia de 62% (DAPs e Ecoinvent) a 73% (SIDAC), valor bastante superior em relação à estrutura, que apresentou variação de 7% (DAPs e Ecoinvent) a 9% (SIDAC). Portanto, a consideração de possíveis perdas no processo em relação ao quantitativo de projeto deve receber atenção especial, especialmente para os elementos de maior dificuldade e imprevisibilidade de execução, como as fundações.

Quando comparados os diferentes fatores (DAPs e Ecoinvent em relação ao SIDAC), percebe-se uma diferença que varia de 9% (dados de projeto) a 11% (dados de obra).

Os resultados com os fatores do SIDAC apresentaram valores menores do que com os dados de DAPs e Ecoinvent. O primeiro motivo é que os dados do SIDAC quantificam somente a emissão de CO_2, e também devido ao maior fator de emissão do aço na DAP escolhida, que é mais de duas vezes superior ao valor médio do SIDAC. Essa diferença pode ser considerada expressiva e evidencia a importância de utilizar dados o mais fidedignos possível na modelagem de ACV.

Em termos de participação dos materiais, o concreto e o aço foram os mais impactantes, seguindo a tendência observada em outros estudos [22,23]. Observa-se um aumento na participação do concreto quando se utilizam dados de obra, especialmente na fundação, o que é esperado, visto que normalmente há mais perdas no processo quando esse material é utilizado (em comparação com o aço), e principalmente na fundação em relação à estrutura. A participação do concreto varia de aproximadamente 70% para 80% (quando DAPs e Ecoinvent são utilizados como fatores) e de 85% para 95% (quando o SIDAC é utilizado). No caso do SIDAC, a participação do concreto é superior e a do aço é inferior, pois o fator de EE do concreto de 40 MPa é maior (339,45 $kgCO_2$-eq/m^3) em comparação com o dado da DAP (305,00 $kgCO_2$-eq/m^3), enquanto o aço apresenta o contrário, com SIDAC (0,74 $kgCO_2$-eq/kg) e DAP (1,62 $kgCO_2$-eq/kg).

CONCLUSÕES

Neste estudo, foram avaliadas as emissões embutidas (EE) de carbono dos elementos de fundação e estrutura de uma edificação em Brasília-DF, resultando em valores que variaram de 165,67 $kgCO_2$-eq/m^2 a 184,18 $kgCO_2$-eq/m^2 para dados de projeto e de 189,87 $kgCO_2$-eq/m^2 a 206,40 $kgCO_2$-eq/m^2 para dados de obra. Observou-se uma diferença significativa quando se comparam dados de obra e de projeto. Para as fundações, essa diferença variou de 62% a 72%, e para a estrutura, de 7% a 9%. Conclui-se a importância de considerar no Inventário do Ciclo de Vida (ICV) as possíveis perdas no processo, especialmente para elementos construtivos de maior dificuldade e imprevisibilidade de execução, como as fundações.

Quando diferentes fatores de EE são considerados na modelagem, os resultados variaram em torno de 10%, o que ressalta a necessidade de uma seleção precisa dos

fatores de EE durante a modelagem da ACV, dando preferência àqueles que melhor representam os materiais utilizados na construção.

Para trabalhos futuros, pretende-se avaliar os outros elementos da edificação (vedações, revestimentos, etc.) para verificar como essas diferenças no consumo efetivo de material afetam a diferença global das EE de uma edificação.

AGRADECIMENTO

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Os autores agradecem ao CNPq - Edital Universal - pelo apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS

[1] IPCC, 2023: Sections. 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.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

[2] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **CO2 Emissions in 2023: A new record high, but is there light at the end of the tunnel ?**. Fev 2024. Disponível em: www.iea.org.

[3] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (PNUMA). **Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector**. Nairobi, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.59117/20.500.11822/45095.

[4] HABERT, G. et al. **Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries.** Nature Reviews Earth and EnvironmentSpringer Nature, 1 nov. 2020.

[5] HUANG, B. et al. Embodied GHG emissions of building materials in Shanghai**. Journal of Cleaner Production**, v. 210, p. 777–785, 10 fev. 2019.

[6] KARLSSON, I. et al. **Achieving net-zero carbon emissions in construction supply chains – A multidimensional analysis of residential building systems.** Developments in the Built Environment, v. 8, 1 set. 2021.

[7] RÖCK, M. et al. **Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation.** Applied Energy, v. 258, 15 jan. 2020.

[8] CARCASSI, O. B. et al. **Material Diets for Climate-Neutral Construction.** Environmental Science and Technology, v. 56, n. 8, p. 5213–5223, 19 abr. 2022.

[9] WORLD GREEN BUILDING CONCIL. **Bringing embodied carbon upfront: Coordinated action for the building and construction sector to tackle embodied carbon.** London, United Kingdom office and Toronto, Canada office, 2019. Disponível em: www.worldgbc.org/embodied-carbon.

[10] WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD); ARUP. **Net-zero buildings: Halving construction emissions today**. [S.l]: WBCSD, 2023. Disponível em: <https://www.wbcsd.org/Pathways/Built-Environment/Resources/Net-zero-buildings-Halving-construction-emissions-today>. Acesso em: 14 abr. 2024.

[11] COSTA, Simone de Fátima Campos e KOS, Darja. **Aplicação da Metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida Energético a uma Residência em Belém-PA.** Paranoá 30: Cadernos de Arquitetura e urbanismo, n. 30, 5 Abr 2021.

[12] CRIPPA, M. et al. **GHG EMISSIONS OF ALL WORLD COUNTRIES**. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2023. Disponível em: https://joint-research-centre.ec.europa.eu.

[13] SEEG. **Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil.** Brasil, Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa - SEEG, 2023.

[14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14040:** Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Principio e estrutura. Rio de Janeiro, 2009a.

[15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009b.

[16] CALDAS, Lucas e PEDROSO, Gilson e SPOSTO, Rosa Maria. **Avaliação do ciclo de vida energético (ACVE) de uma habitação. Estudo para diferentes cenários considerando as etapas do berço ao túmulo.** São Paulo, 2016. Disponível em: https://vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/16.191/6012. Acesso em: maio 2024.

[17] BSI STANDARDS PUBLICATION. **EN 15978**: Sustainability of construction works: Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method. Brussels: CEN - European Committee for Standardization, 2011.

[18] BSI STANDARDS PUBLICATION. **EN 15804:2012+A2**: Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products. Brussels: CEN - European Committee for Standardization, 2019.

[19] ASBEA. **Guia para Arquitetos na Aplicação da Norma de Desempenho:** ABNT NBR 15.575. Brasil, 2015.

[20] FRISCHKNECHT, R. et al. **Comparison of the greenhouse gas emissions of a high-rise residential building assessed with different national LCA approaches - IEA EBC Annex 72**. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Anais...IOP Publishing Ltd, 20 nov. 2020.

[21] LETI. **Embodied Carbon Primer. Supplementary guidance to the Climate Emergency Design Guide.** London Energy Transformation Initiative – LETI, United Kingdom, 2020.

[22] Röck M, Sørensen A, Tozan B, Steinmann J, Le Den X, Horup L H, Birgisdottir H. **Towards EU embodied carbon benchmarks for buildings – Setting the baseline: A bottom-up approach**, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.5281/zenodo.5895051. Acesso em: abril 2024.

[23] MELO, P. C. DE et al. **The potential of carbon storage in bio-based solutions to mitigate the climate impact of social housing development in Brazil**. Journal of Cleaner Production, v. 433, 25 dez. 2023.