XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8830

Redução de Carbono Incorporado pela Substituição do Aço por Macrofibras Sintéticas em Pisos Industriais

Reduction of Embodied Carbon through the Replacement of Steel with Synthetic Macrofibers in Industrial Floors

Giovanna Ferreira Alves
PPGEC/UFPR | Curitiba | Brasil | giovannaferreira@ufpr.br
Milena Franco Fagundes
PPGEC/UFPR | Curitiba | Brasil | milenafagundes@ufpr.br
Sergio Fernando Tavares
PPGEC/UFPR | Curitiba | Brasil | sergio.tavares@ufpr.br

Resumo

A busca por edificações mais sustentáveis tem ganhado destaque no setor industrial. Uma Avaliação do Ciclo de Vida Energética (ACVE) foi aplicada a uma edificação industrial, com o objetivo de calcular o carbono e a energia incorporados na fase pré-operacional da edificação. Diante dos resultados, buscaram-se estratégias de redução por meio da substituição de materiais. Assim, este estudo apresenta os resultados da ACVE e analisa, em termos de carbono incorporado, a substituição do aço por macrofibra sintética no piso. A metodologia adotada segue as diretrizes estabelecidas pelas normas internacionais ISO 14040 e ISO 14044, bem como pelas normas europeias EN 15978 e EN 15804. Um modelo BIM foi utilizado para a extração do inventário de materiais e Declarações Ambientais de Produto foram empregadas na análise para a proposição de estratégias de redução. Os resultados indicam que o aço empregado na estrutura metálica e o concreto empregado na fundação são os materiais de maior impacto. Além disso, substituir o aço no piso de concreto armado por macrofibras sintéticas reduz a quantidade de carbono incorporado.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida. Carbono embutido. Energia embutida. DAP.

Abstract

The pursuit of more sustainable buildings has gained prominence in the industrial sector. A Life Cycle Energy Assessment (LCEA) was conducted for an industrial building in Brazil, aiming to quantify the embodied carbon and energy during the building's pre-operational phase. Based on the results, reduction strategies were explored through material substitution. This study presents the LCEA results and analyzes, in terms of embodied carbon, the replacement of steel with synthetic macrofibers in the floor system. The methodology follows the guidelines established by the international standards ISO 14040 and ISO 14044, as well as the European standards EN 15978 and EN 15804. A BIM model was used to extract the material inventory, and Environmental Product Declarations (EPDs) were employed to support the analysis and the proposal of reduction strategies. The results indicate that the steel used in the structural system and the concrete used in the foundation are the most impactful materials. Furthermore, replacing steel reinforcement in the concrete floor with synthetic macrofibers reduces embodied carbon.

Keywords: Life Cycle Assessment. Embodied carbon. Embodied energy. EPD.

ALVES, G. F.; FAGUNDES, M. F.; TAVARES, S. F. Redução de Carbono Incorporado pela Substituição do Aço por Macrofibras Sintéticas em Pisos Industriais. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21, 2026, Goiânia. **Anais**... Goiânia: ANTAC, 2026.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8830

INTRODUÇÃO

A busca por edificações mais sustentáveis tem ganhado destaque no setor industrial, onde o consumo de energia tende a ser elevado desde as fases iniciais do projeto até a operação. Nesse contexto, a eficiência energética representa um vetor estratégico para a redução dos impactos ambientais e a otimização do uso dos recursos naturais.

A ACV vem sendo ampliada para análises integradas com tecnologias digitais e políticas ambientais. Revisões sistemáticas como as de Lima et al. (2021) [1] e Benachio et al. (2020) [2] demonstram que a ACV é a metodologia mais empregada em estudos de sustentabilidade na construção, servindo de base para conceitos de Economia Circular, Carbono Zero e Design para Desmontagem. A integração com o Building Information Modeling (BIM) potencializa o uso da ACV ao permitir a extração automatizada de inventários e a vinculação de dados ambientais diretamente aos elementos do modelo digital [3]. No contexto brasileiro, a aplicação da ACV vinculada ao BIM para comparar cenários de substituição de materiais, obtém reduções de 42,36% nas emissões totais de CO_2 equivalente nos estágios A1–A5, resultado que evidencia o impacto das decisões projetuais iniciais [4]. Apesar dos avanços, autores como Pomponi e Moncaster (2023) [5] alertam que a precisão da ACV depende fortemente da qualidade dos dados de inventário locais, ainda escassos em países emergentes.

No contexto da construção civil, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e a Avaliação do Ciclo de Vida Energético (ACVE) têm se destacado como ferramentas essenciais para a transição rumo a edificações de baixo carbono, dada a significativa contribuição do setor para as emissões globais de gases de efeito estufa (cerca de 37% do total mundial, somando energia operacional e emissões incorporadas [6]). A metodologia permite mapear e quantificar os *hotspots* ambientais (etapas ou materiais de maior impacto), apoiando a definição de estratégias de mitigação desde as fases iniciais de projeto [7]. Segundo a norma europeia EN 15978 [8], o ciclo de vida das edificações é dividido em quatro módulos principais: A (produção e construção), B (uso e manutenção), C (fim de vida) e D (benefícios além dos limites do sistema). Os estágios A1 a A5, conhecidos como fase pré-operacional, englobam a extração de matérias-primas, transporte, fabricação, processos construtivos e perdas de obra, etapas frequentemente negligenciadas em análises convencionais, mas que podem representar até 70% das emissões totais de carbono incorporado em edificações novas [2], [9].

Neste estudo, a ACVE é aplicada a um projeto de uma edificação industrial, localizada na cidade de Curitiba, Paraná, Brasil. O estudo avalia o impacto da substituição do aço por macrofibras sintéticas no piso de concreto armado da edificação e apresenta os resultados da ACVE. O escopo da análise abrange a fase pré-operacional do ciclo de vida, etapas A1 a A3, de acordo com a norma europeia EN 15978 [8]. As unidades funcionais adotadas são o consumo de energia, expresso em megajoules por metro quadrado (MJ/m^2), e as emissões de dióxido de carbono por metro quadrado ($kgCO_2/m^2$).

REFERENCIAL TEÓRICO

A ACV é uma metodologia consolidada para mensurar e interpretar os impactos ambientais de produtos, processos ou sistemas, considerando todas as etapas do seu ciclo, da extração de matérias-primas à disposição final. Baseada nas normas ISO 14040 [10] e ISO 14044 [11], a ACV organiza-se em quatro fases interdependentes: (i) definição de objetivo e escopo, (ii) análise de inventário do ciclo de vida (ICV), (iii) avaliação de impactos ambientais (AIA) e (iv) interpretação dos resultados. Diferentemente de métodos pontuais de avaliação ambiental, a ACV adota uma abordagem sistêmica e multicriterial, considerando fluxos de entrada e de saída (energia, materiais, emissões, resíduos e efluentes) para quantificar impactos como o potencial de aquecimento global (*GWP*), acidificação, eutrofização, toxicidade e uso de recursos naturais [5], [12]. Essa perspectiva abrangente permite compreender a magnitude dos efeitos ambientais cumulativos ao longo da vida útil das edificações e fundamentar escolhas técnicas que alinhem desempenho construtivo e sustentabilidade.

A ACVE consiste em uma vertente simplificada da ACV, concentrando-se exclusivamente nos aspectos energéticos envolvidos em cada etapa do ciclo de vida de um produto, sistema ou edificação. Seu objetivo é quantificar e analisar os fluxos de energia desde a extração das matérias-primas até o fim da vida útil, abrangendo as fases de fabricação, transporte, uso, manutenção e descarte. Essa abordagem permite identificar os estágios com maior demanda energética e, consequentemente, maior potencial de mitigação de impactos por meio da adoção de estratégias mais eficientes ou de materiais de menor energia incorporada [13][14]. Ao restringir o foco à dimensão energética, a ACVE proporciona uma compreensão mais direta da intensidade energética dos sistemas construtivos, revelando oportunidades de redução tanto do consumo de energia primária quanto das emissões associadas.

Uma ACVE não substitui uma ACV plenamente, porém se presta a análises mais detalhadas das variáveis de insumo energético ao longo do ciclo de vida podendo, a partir destas definir impactos ambientais importantes como emissões de CO_2, pleno ou equivalente [15]. A interpretação destes impactos, por sua vez, pode fundamentar índices como as pegadas de carbono, que são requisitos para a emissão de créditos de carbono.

METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo é dividida em duas etapas. A primeira etapa consiste em calcular o carbono e a energia incorporados da edificação analisada por meio do método de cálculo proposto na tese de Tavares (2006) [16], complementado por atualização metodológica no artigo de Tavares e Bragança (2016) [17]. Além disso, foram utilizados dados de inventários ambientais de fontes reconhecidas, como as Declarações Ambientais de Produto (DAPs) de fornecedores nacionais e internacionais. Os cálculos seguem as diretrizes estabelecidas pelas normas internacionais ISO 14040 [10] e ISO 14044 [11], que tratam da ACV, além das normas

europeias EN 15804 [18] e EN 15978 [8], específicas para avaliação ambiental de edificações.

A estrutura da ACVE aqui apresentada considera as etapas iniciais do ciclo de vida da edificação: extração e produção de materiais e inclui a energia incorporada nos processos de extração de matérias-primas, manufatura e processamento industrial. Essas etapas são descritas na norma EN 15978 [8] como A1, A2 e A3.

As métricas avaliadas incluem a energia primária total (MJ) e as emissões de dióxido de carbono ($kgCO_2$). Esses indicadores permitem caracterizar o desempenho energético e ambiental da edificação nas etapas iniciais do seu ciclo de vida.

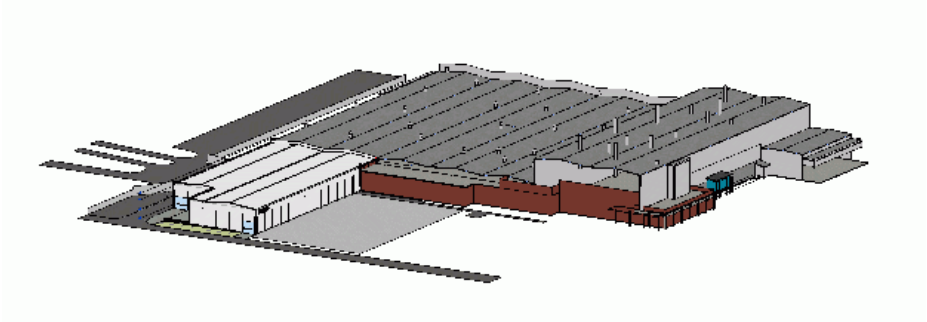
A segunda etapa da metodologia analisou e comparou o uso de macrofibras sintéticas em substituição ao aço no piso do empreendimento. A análise surgiu da demanda da empresa gerenciadora do projeto para reduzir o impacto ambiental de carbono no empreendimento, por meio da substituição do aço.

DESCRIÇÃO DO PRÉDIO INDUSTRIAL

A edificação estudada neste trabalho corresponde a um armazém industrial localizado na cidade de Curitiba, no Estado do Paraná. O projeto possui uma área construída de 4.431,46 m² e adota um sistema construtivo convencional para edificações industriais. A fundação é composta por estacas do tipo hélice contínua, blocos de fundação e piso/radier em concreto. Com estrutura metálica, as vedações verticais utilizam blocos de concreto, com acabamento em telhas metálicas, e a cobertura é formada por telhas metálicas de duas faces, com isolamento térmico de lã de rocha.

A Figura 1 apresenta a visualização 3D do modelo BIM da edificação. O projeto foi disponibilizado pela empresa responsável pelo desenvolvimento do empreendimento, desde a fase de projeto até a reforma/construção.

Figura 1: Visualização 3D



Fonte: Empresa responsável pelo desenvolvimento do empreendimento, via Revit (2025).

O inventário deste projeto foi feito com base na extração de quantidades do modelo BIM e na coleta de dados dos projetos estruturais em .dwg. O modelo BIM apresentada os dados de projeto de arquitetura com as tabelas de quantidades de todos os materiais. A extração desses materiais foi direta para compor o inventário. Em relação aos projetos estruturais (concreto armado e estruturas metálicas), foi disponibilizado

o arquivo .dwg. Assim, foi preciso fazer a leitura de todas as pranchas e o levantamento quantitativo dos materiais relacionados a essa disciplina de projeto.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A energia incorporada total estimada da edificação é de 11.879.886,19 MJ, o que corresponde a 2.680,80 MJ/m². O aço A36, material da estrutura metálica, apresenta a maior energia incorporada, totalizando 4.993.292,27 MJ, seguido pelo concreto fck=30 MPa, com 3.565.751,94 MJ.

Em relação à distribuição percentual da energia incorporada entre os dez principais materiais, o aço A36 representa 42,03%, seguido pelo concreto fck=30MPa com 30%, o aço CA-50 com 12,80% e os painéis de cobertura tipo sanduíche em aço com 3,67%. Esses quatro materiais, juntos, correspondem a 88% da energia total incorporada da edificação.

Em relação ao carbono incorporado, o aço A36 é o principal emissor (47,66%), seguido pelo concreto com fck=30 MPa (41,09%), pelo concreto com fck=40 MPa (4,91%) e pelo aço CA-50 (2,97%). Em conjunto, esses quatro materiais correspondem a mais de 96% do CO_2 incorporado.

A Tabela 1 apresenta os valores de $kgCO_2$ e MJ incorporados em cada material.

Tabela 1: Resultados de energia e CO_2 incorporados

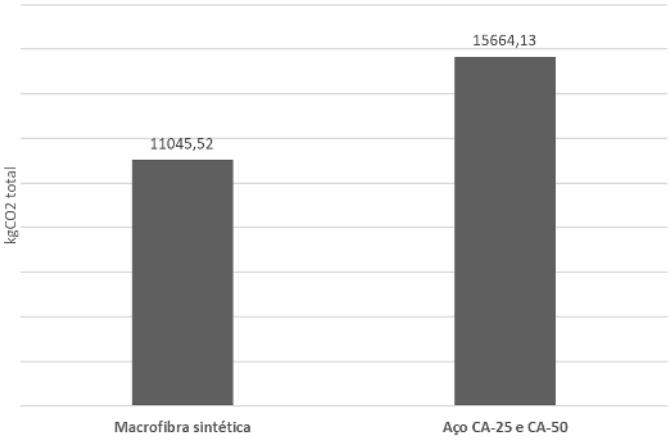
Material	Totais $kgCO_2$	Percentual $KgCO_2$	Totais MJ	Percentual MJ
Concreto fck= 30Mpa	328499,15	41,09%	3565751,94	30,02%
Concreto fck=40Mpa	39234,49	4,91%	409283,88	3,45%
Aço CA-25	3611,79	0,45%	271547,64	2,29%
Aço CA-50	23780,68	2,97%	1520531,91	12,80%
A36	381017,90	47,66%	4993292,27	42,03%
Bloco de concreto 19 cm x 19 cm x 39 cm	3639,99	0,46%	90750,31	0,76%
Cerâmica revestimento	314,01	0,04%	6112,14	0,05%
Tintas	3122,00	0,39%	42401,18	0,36%
Portas de madeira	22,30	0,00%	624,32	0,01%
Placa de gesso 70 cm x 70 cm	1374,55	0,17%	24541,30	0,21%
Telha sanduíche de aço. Galvalume RAL9003 Esp da chapa 0,43mm.	7900,93	0,99%	436515,52	3,67%
Telha de aço TP25 Pré pintada nas 02 faces, espessura 0,5mm	3884,49	0,49%	261657,88	2,20%
Lã de rocha 50mm	200,57	0,03%	99643,33	0,84%
Guarda corpo e corrimão	36,37	0,00%	2009,44	0,02%
Argamassa	2555,20	0,32%	141171,13	1,19%
Aço e ferro	254,34	0,03%	14052,00	0,12%
Total	799448,76	100%	11.879.886,19	100%
Total por m²	180,40		2680,80	

Fonte: os autores.

A análise comparativa de $kgCO_2$ entre o concreto armado e o concreto com macrofibras sintéticas a ser utilizado no piso foi feita substituindo todo o quantitativo de aço do piso (CA-25 e CA-50) para o novo quantitativo de macrofibras sintéticas. Estabeleceu-se o uso de 6kg de macrofibras para 1m³ de concreto, quantitativo disponibilizado pela empresa. Assim, a massa total de macrofibras nesta análise é de 3808,80kg. Utilizou-se a EPD de uma macrofibra sintética de polipropileno virgem, desenvolvida em Israel, denominada KraTos Macro PP Synthetic Fibre Concrete Reinforcement, como referência para a macrofibra a ser empregada.

A Figura 2 apresenta a quantidade de $kgCO_2$ do aço e da macrofibra sintética.

Figura 2: Comparação entre $kgCO_2$ dos aços CA-25 e CA-50 e macrofibra sintética



Fonte: os autores.

Com a substituição dos aços do piso de concreto armado pelo uso das macrofibras sintéticas, as emissões de CO_2 na fase pré-operacional diminuem 1% (8230,39kg), o que equivale 1,86 $kgCO_2/m^2$ do empreendimento.

DISCUSSÕES

Os resultados mostram uma redução no impacto ambiental, evidenciando uma diminuição nas emissões de CO2 nas primeiras fases do projeto. Contudo, essa redução corresponde a cerca de 1% em relação ao total de materiais utilizados no empreendimento. Uma das razões para o impacto ser considerado mínimo é que a quantidade de material empregado é pequena se comparada aos volumes de concreto e aço A36. Como esses dois materiais representam mais de 95% das emissões de CO2, a substituição apenas deles poderia gerar uma redução significativa no impacto ambiental do projeto.

Nesta análise, utilizou-se a EPD da fibra de polipropileno virgem, produzida em Israel, como referência. Fibras de outros materiais e produzidas em outras regiões podem alterar os resultados obtidos. No Brasil, não existe nenhuma EPD publicada para este tipo de material. Por este motivo, utilizou-se um material internacional para efeito de comparação. Os materiais similares encontrados no Brasil são SikaFiber® MFPP da Sika Brasil e Macrofibra de polipropileno mesh da Quartzolit. Além disso, a empresa gerenciadora do projeto não disponibilizou a especificação da fibra a ser utilizada.

CONCLUSÃO

Este estudo apresentou os resultados da ACVE desenvolvida em uma edificação industrial, em Curitiba, Paraná. Os resultados mostram a redução de carbono e de energia incorporados pela substituição de aço por macrofibras sintéticas no piso da edificação.

Para aprimoramento dessa análise, sugere-se a confirmação do material da fibra sintética e quantidade exata a ser utilizada. Com essas informações definidas pelo projetista, é possível chegar em números mais precisos da análise.

Como pesquisas futuras, sugere-se a desenvolver uma ACV(E) para as fases de uso, operação e fim de vida da edificação. As análises das fases de uso e operação envolvem estudos de eficiência energética que avaliam a geração de energia e sistemas como iluminação, climatização e maquinário. As fases de fim de vida envolvem estudos de economia circular, incluindo a otimização do aproveitamento de resíduos e oportunidades de reciclagem e recuperação de materiais, utilizando documentação digital como Passaportes de Materiais.

DECLARAÇÃO

Os autores declaram que não utilizaram IA generativa nem tecnologias assistidas por IA no processo de preparação do manuscrito.

REFERÊNCIAS

[1] LIMA, L.; TRINDADE, E.; ALENCAR, L.; ALENCAR, M.; SILVA, L. Sustainability in the construction industry: a systematic review of the literature. **Journal of Cleaner Production**, v. 289, p. 125730, mar. 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125730.

[2] BENACHIO, G. L. F.; FREITAS, M. do C. D.; TAVARES, S. F. Circular economy in the construction industry: a systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 260, jul. 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121046.

[3] GOMES, V.; BARROS, N. N. Contribuição da modelagem BIM para facilitar o processo de ACV de edificações completas. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 13, n. 2, p. 19, maio 2018. DOI: https://doi.org/10.11606/gtp.v13i2.142139.

[4] FAGUNDES, M. F.; TAVARES, S. F. Avaliação da redução de emissões de CO_2 pela substituição de materiais com suporte de BIM e ACV. 2025. DOI: https://doi.org/10.46421/euroelecs.v6.7905.

[5] POMPONI, F.; MONCASTER, A. Circular economy for the built environment: a research framework. **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 710–718, fev. 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.055.

[6] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. 2023 **Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-Emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector**. 2023. DOI: https://doi.org/10.59117/20.500.11822/45095

[7] DIXIT, M. K. Life cycle embodied energy analysis of residential buildings: a review of literature to investigate embodied energy parameters. **Renewable and Sustainable**

Energy Reviews, v. 79, p. 390–413, nov. 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.051.

[8] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 15978: **Sustainability of Construction Works – Assessment of Environmental Performance of Buildings: Calculation Method**. Bruxelas, 2011.

[9] HAMMOND, G. P.; JONES, C. I. Embodied energy and carbon in construction materials. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Energy,** v. 161, n. 2, p. 87–98, maio 2008. DOI: https://doi.org/10.1680/ener.2008.161.2.87.

[10] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14040: Environmental Management – Life cycle Assessment – Principles and framework.** Genebra, 2006.

[11] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14044: Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines.** Genebra, 2006.

[12] CABEZA, L. F.; RINCÓN, L.; VILARIÑO, V.; PÉREZ, G.; CASTELL, A. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p. 394–416, jan. 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037.

[13] CHAU, C. K.; LEUNG, T. M.; NG, W. Y. A review on life cycle assessment, life cycle energy assessment and life cycle carbon emissions assessment on buildings. **Applied Energy**, v. 143, p. 395–413, abr. 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.023.

[14] HUMBERT, S.; SCHRYVER, A. de; BENGOA, X.; MARGNI, M.; JOLLIET, O. **IMPACT 2002+: User Guide**. Quantis, 2012. 40 p.

[15] FAY, M. R. **Comparative life cycle energy studies of typical Australian suburban dwellings**. 1999. Dissertação – Universidade de Melbourne, Melbourne, 1999.

[16] TAVARES, S. F. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. 2006. Tese – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

[17] TAVARES, Sergio Fernando; BRAGANÇA, Luís. Índices de CO2 para materiais de construção em edificações brasileiras. **Sustainable Urban Communities towards a Nearly Zero Impact Built Environment**, p. 927-936, 2016.

[18] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 15804: **Sustainability of Construction Works – Environmental Product Declarations – Core Rules for the Product Category of Construction Products**. Bruxelas, 2012