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.v21i1.8829

Mitigação do Carbono Embutido na Construção Civil: Análise do Ciclo de Vida Comparativa entre Retrofit e Reconstrução

Mitigating Embodied Carbon in the Construction Sector: Comparative Life Cycle Assessment between Retrofit and Reconstruction

Bianca Danieli da Silva
Universidade Federal do Paraná | Curitiba | Brasil | biancadanieli@ufpr.br
Sergio Fernando Tavares
Universidade Federal do Paraná | Curitiba | Brasil | sergioftavares@gmail.com

Resumo

O setor da construção civil enfrenta o desafio crítico da descarbonização, exigindo estratégias que reduzam o carbono embutido no ambiente construído. Este estudo apresenta uma Análise de Ciclo de Vida (ACV) pré-operacional de uma edificação comercial em desuso em Joinville-SC, comparando o potencial de mitigações de emissões de CO_2, entre três cenários de intervenção. O cenário 1 (Construção Nova) estabelece a linha base ao simular a execução integral de um edifico equivalente seguindo padrões convencionais. O cenário 2 (Demolição e Obra Nova) quantifica o impacto acumulado do descarte de energia incorporada na estrutura existente somado à logística de resíduos e à construção de um novo prédio. O cenário 3 (Retrofit Sustentável) foca na preservação dos sistemas estruturais e de vedação, integrando tecnologias de microgeração de energia e soluções biofílicas. Os resultados indicam que o retrofit proporciona uma economia drástica de emissões ao evitar a produção de novos materiais intensivos em carbono. Conclui-se que o reaproveitamento do estoque edificado é peça-chave para a economia circular e resiliência urbana.

Palavras-chave: Retrofit sustentável. Avaliação do Ciclo de Vida. Carbono embutido. Descarbonização. Reuso Adaptativo.

Abstract

The construction sector faces the critical challenge of decarbonization, requiring strategies that reduce the embodied carbon within the built environment. This study presents a pre-operational Life Cycle Assessment (LCA) of a disused commercial building in Joinville-SC, comparing the potential for CO_2 emission mitigation across three intervention scenarios. Scenario 1 (New Construction) establishes the baseline by simulating the full execution of an equivalent building following conventional standards. Scenario 2 (Demolition and New Build) quantifies the cumulative impact of discarding the embodied energy of the existing structure, combined with waste logistics and the construction of a new building. Scenario 3 (Sustainable Retrofit) focuses on the preservation of structural and building envelope systems, integrating micro-generation technologies, and biophilic solutions. The results indicate that retrofitting provides a drastic reduction in emissions by avoiding the production of new carbon-intensive materials. It is concluded that the adaptive reuse of the building stock is a key element for the circular economy and urban resilience

Keywords: Sustainable retrofit. Life Cycle Assessment (LCA). Embodied Carbon. Decarbonization. Adaptive Reuse.

Como citar:
SILVA, B. D.; Tavares, S. F. Mitigação do Carbono Embutido na Construção Civil: Análise do Ciclo de Vida Comparativa entre Retrofit e Reconstrução. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21, 2026, Goiânia. **Anais**... Goiânia: ANTAC, 2026.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8829

INTRODUÇÃO

O setor da construção civil é um dos principais responsáveis pelo consumo de recursos naturais e pela emissão de gases de efeito estufa (GEE) em escala global, historicamente, os esforços de descarbonização concentram-se na eficiência energética operacional, o reuso adaptativo e *retrofit* de baixo carbono emergem como estratégias imperativas para reter o estoque de carbono já consolidado no ambiente construído.

A literatura internacional aponta que a reabilitação estrutural pode reduzir significativamente as emissões iniciais em comparação com a demolição e subsequente reconstrução [2,6], no entanto a maior parte dos estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) aplicados ao *retrofit* está concentrado no hemisfério norte, sob condições climáticas temperadas e matrizes industriais distintas, em economias emergentes, como no Brasil, a carência de inventário de ciclo de vida (ICV) específicos e a dependência de fatores de emissão genéricos limitam a precisam das análises de sensibilidade ecológica, obscurecendo o real potencial de descarbonização profunda em intervenções de *retrofit*. Ademais centros urbanos de médio porte enfrentam um crescimento acelerado de passivos imobiliários e edificações em desuso, gerando degradação socioambiental urbana.

Este artigo propõe avançar nesta lacuna cientifica ao quantificar e comparar por meio de ACV pré-operacional, o potencial de mitigação de CO_2 embutido em diferentes cenários de intervenção de uma edificação comercial em desuso no sul do Brasil. O objetivo principal é avaliar a viabilidade de um *retrofit* sustentável focado na simbiose entre preservação estrutural e a inserção de tecnologias de matriz renovável e soluções biofílicas, justifica-se a relevância desta abordagem pela necessidade de fornecer indicadores empíricos e metodológicos que subsidiem política de economia circular e transição ecológica no ambiente construído de países em desenvolvimento.

Método

A presente pesquisa adota como procedimento metodológico a Análise de Ciclo de Vida (ACV) do berço ao portão (A1-A3, segundo EN 15978) [1] com foco na quantificação das emissões de dióxido de carbono (CO_2) embutido nos materiais de construção. O objetivo é comparar o impacto ambiental de três cenários distintos aplicados a uma edificação comercial de médio porte, com aproximadamente 620m² de área construída, localizada em Joinville, Santa Catarina. A análise concentra-se na fase pré-operacional, abrangendo os estágios de extração de matérias-primas, processamento e transporte até o canteiro de obras.

Para a viabilização do estudo, o método foi desenvolvido em três etapas principais. Primeiramente, estabeleceu-se o inventário de materiais de referência utilizando os índices de consumo de massa por metro quadrado (t/m²) de acordo com Tavares [2]. Tais índices, fundamentados na NBR 12721 [3], permitem estimar os quantitativos de concreto, aço, argamassas e alvenaria cerâmica para uma edificação padrão comercial similar ao objeto de estudo, resultando em uma massa global estimada.

Em uma segunda etapa, as emissões de CO_2 foram calculadas através da aplicação dos fatores de emissão padrão [2]. Os cálculos seguiram a lógica de quantificação volumétrica e mássica, onde cada insumo foi multiplicado pelo seu respectivo valor de impacto ambiental expresso em tCO_2/t.

Por fim, a comparação estruturou-se em três cenários: (I) Construção Nova, que estabelece a linha de base de emissões para um prédio equivalente ao existente; (II) Demolição do atual edifício, que contabiliza o impacto ambiental adicional de gestão de resíduos e as emissões para um prédio novo; e (III) *Retrofit* Sustentável, que foca na preservação dos sistemas estruturais e de vedação quantificando apenas as emissões provenientes das intervenções de readequação e novos materiais.

ESTUDO DE CASO

A análise adotada tem como objeto de estudo uma edificação comercial de médio porte, de aproximadamente 620m² de área construída e 10450m² de terreno, esse edifício está localizado no Bairro Bucarein em Joinville- SC (Figura 1). A construção está sofrendo por conta de um impasse jurídico, o imóvel está penhorado por dívidas e é alvo de uma ação civil pública [4]. Atualmente o edifício está em estado de abandono, com várias pichações, sem esquadrias e em volto de vegetação que quase o cobre e precisa de reformas caso queira uma nova utilização.

Considerando o potencial de reaproveitamento da estrutura existente, delineou-se um projeto de *retrofit* sustentável focado em um programa de necessidades comercial flexível. O detalhamento adotado corresponde ao nível de projeto básico, estabelecendo as delimitações dos ambientes e especificação de sistemas construtivos de baixo impacto, com coberturas biogênicas e sistemas de microgeração energética. Essa abordagem visa converter o passivo urbano em um modelo de arquitetura resiliente, utilizando o inventário de materiais remanescentes como base para uma estratégia de descarbonização profunda do ambiente construído.

Figura 1: Imagem da edificação atualmente (abril de 2026)



Fonte: os autores.

CENÁRIOS DE ANÁLISE

A avaliação do impacto foi estruturada a partir da comparação de três cenários distintos, permitindo mensurar o potencial de descarbonização da intervenção proposta.

Cenário 1 (Construção nova): Estabelece a linha de base de emissões para um edifício equivalente ao existente. Para este fim, adotaram-se os índices de quantitativo de material por área construída do projeto padrão comercial normal, conforme a NBR 12721 [3], por apresentar maior similaridade tipológica com o objeto de estudo. A análise se concentrou nos materiais passíveis de quantificação e comparação direta com as intervenções de *retrofit*.

Cenário 2 (Demolição e Obra Nova): Contabiliza o impacto ambiental acumulado da gestão de resíduos gerados na desconstrução do edifício atual e à implantação de um edifício novo. Este cenário evidencia o descarte da energia incorporada nos elementos demolidos e o impacto ambiental inerente à fabricação de novos sistemas construtivos em substituição aos preexistentes.

Cenário 3 (*Retrofit* Sustentável): Foca na preservação dos sistemas estruturais e de vedação, quantificando apenas as emissões provenientes das intervenções de readequação e novos materiais. O projeto hipotético de uso comercial integra o reaproveitamento estrutural a tecnologias de alto desempenho visando a resiliência climática.

Neste cenário, além das reformas necessário para nova utilização, foram adotadas soluções estratégicas para otimizar o ciclo de vida da edificação: cobertura verde, painéis fotovoltaicos e fachada verde. A instalação de painéis fotovoltaicos visa a autossuficiência energética, compensando o impacto ambiental residual das intervenções e reduzindo as emissões de gases poluentes durante a vida útil operacional com interferências mínimas na estrutura consolidada.

EMISSÕES DE CO_2

A metologia para o cálculo de emissões de CO_2 fundamenta-se na Análise de Ciclo de Vida (ACV) simplificada, abordando os estágios de produção dos materiais, A1-A3 conforme a norma EN 15978 [1]. O desenvolvimento do cálculo seguiu três etapas:

Etapa I: Definição do Inventário de Massa

A quantificação mássica da edificação foi realizada através da aplicação dos índices de consumo de matérias por metro quadrado (t/m²) estabelecidos pela NBR 12721 (2005) [3]. Estes índices decompõem-se nas massas de concreto estrutural, aço, alvenarias cerâmicas e argamassas, permitindo uma estimativa da “massa estocada” no edifico existente.

Etapa II: Fatores de Emissão de CO_2

Para converter a massa física em impacto ambiental, foram utilizados os Fatores de Emissão Padrão [2]. Estes fatores refletem a intensidade de carbono da matriz

industrial brasileira. Os cálculos seguiram a lógica de quantificação volumétrica e mássica, onde cada insumo foi multiplicado pelo seu respectivo fator de impacto ambiental.

Etapa III: Equação Aplicada

As emissões totais foram obtidas através da soma ponderada da massa de cada insumo multiplicada pelo seu respectivo fator de emissão, conforme a equação:

$$\mathrm{E}_{total} = \mathrm{M}_{material} \times \mathrm{E}_{material}$$

Onde:

E_{total} = Emissão de CO_2 total

$M_{material}$ = Massa do material

$E_{material}$ = Emissão de CO_2 do material

Quadro 1: Materiais inclusos no quantitativo e valores de CO_2 embutido por material

Material	**Cenário 1: Construção Nova**	**Cenário 2: Demolição e obra nova**	**Cenário 3: *retrofit***	**CO_2 embutido**
Concreto	Sim	Sim	Sim	0,12 tCO_2/t
Cimento	Sim	Sim	Sim	0,79 tCO_2/t
Areia	Sim	Sim	Sim	0,03 tCO_2/t
Tijolo Cerâmico	Sim	Sim	Sim	0,17 tCO_2/t
Telha de Fibrocimento	Sim	Sim	Sim	0,72 tCO_2/t
Revestimento Cerâmico	Sim	Sim	Sim	0,29 tCO_2/t
Vidro	Sim	Sim	Sim	0,99 tCO_2/t
Tinta	Sim	Sim	Sim	3,57 tCO_2/t
Aço	Sim	Sim	Sim	2,73 tCO_2/t
Fachada Verde em manta	Não	Não	Sim	0,019 tCO_2/m^2
Painel Fotovoltaico	Não	Não	Sim	0,18 tCO_2/m^2
Cobertura Verde Vernacular	Não	Não	Sim	0,0042 tCO_2/m^2

No cenário 1, para a determinação da massa de cada material, as quantidades por metro quadrado de construção fornecidas pela NBR 12721 [3] para a tipologia de Padrão Comercial Normal foram padronizadas e convertidas em unidade de massa por metro quadrado (t/m^2). As quantidades informadas em volume foram multiplicadas pelas suas respectivas densidades. Para materiais informados em unidade de área, aplicou-se o produto entre a área, a espessura e a densidade do material. A quantidade de tijolos, reportada em unidades, foi convertida a partir do volume unitário e densidade da cerâmica vermelha. Por fim, a massa total de cada componente foi multiplicada pela área da edificação e pelo respectivo fator de emissão de CO_2.

No cenário 2, que compreende a demolição e a obra nova, o cálculo seguiu a mesma lógica de conversão mássica aplicada ao cenário anterior, porém acrescida do impacto ambiental proveniente da demolição da estrutura existente. Para a quantificação das emissões logísticas, estimou-se o volume de resíduos de construção e demolição (RCD) gerado, multiplicando a massa de entulho pela distância média de transporte até o aterro licenciado em Joinville e pelo respectivo fator de emissão do modal rodoviário.

No cenário 3, a obtenção dos quantitativos baseou-se no levantamento das áreas e volumes das novas intervenções propostas. Para a quantificação do carbono embutido nas tecnologias sustentáveis, optou-se pela manutenção da unidade funcional em tCO_2/m^2, garantindo a compatibilidade com os indicadores de desempenho reportados na literatura técnica recente. Essa metodologia de padronização por unidade de área permitiu a integração direta desses componentes ao inventário global de emissões da edificação, viabilizando uma análise comparativa homogênea entre os cenários.

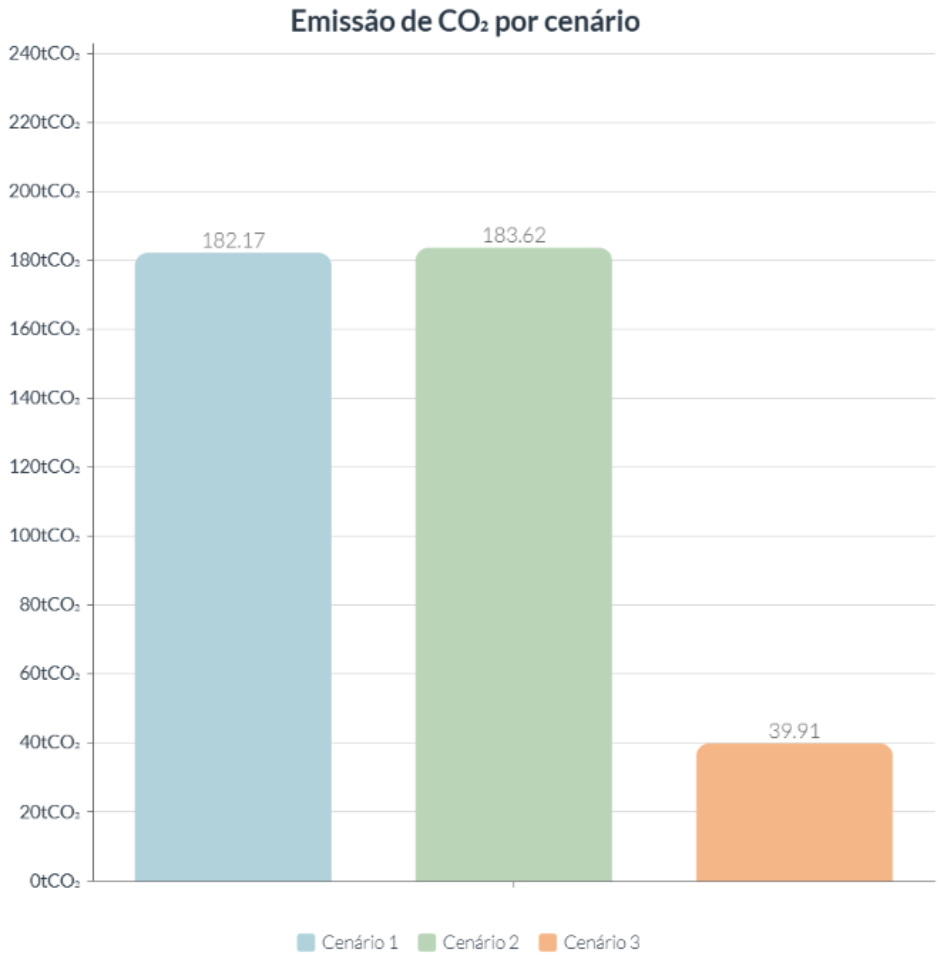
Os fatores de emissão de CO_2 para cada material de construção foram compilados a partir da literatura, conforme detalhado no Quadro 1. Os valores de densidade, fatores de transporte e índices de desperdício adotados seguiram as referências técnicas de Tavares [3]. Para os painéis fotovoltaicos foi adotado um índice de acordo com a fundamentação teórica que advém do relatório do IPCC (2022) [5], para a fachada verde em manta e para a cobertura verde vernacular a origem do dado baseia-se no estudo de Ottelé et al. (2011) [6], publicado no *Journal of Cleaner Production*.

RESULTADOS

A quantificação das emissões de dióxido de carbono revelou disparidades significativas entre as estratégias de intervenção analisadas. Os gráficos (figura 2) apresentados consolidam o inventário de carbono embutido previsto para os três cenários. Os dados demonstram que a emissão geral pela execução integral de uma edificação nova é substancialmente superior ao impacto residual das reformas propostas no cenário de *retrofit*, enquanto o cenário de demolição + construção nova tem uma emissão tem um valor de emissão mais elevado.

Figura 2: Emissões de CO_2 embutido por cenário de intervenção

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8829



Fonte: os autores.

A modelagem quantitativa evidenciou o impacto discrepante entre as abordagens de intervenção, o cenário 1 (Construção Nova), adotado como linha de vase através dos parâmetros de consumo mássico da NBR 12721 [3], resultou em uma emissão total de 182,17 tCO_2, o cenário 2 (Demolição e Obra Nova) apresentou o maior passivo ambiental do estudo, totalizando 183,62 tCO_2, este incremento deve-se não apenas à reprodução integral da nova estrutura, mas também ao impacto logístico do transporte de resíduos de construção e demolição (RCD) até o aterro licenciado, computando em 1,45 tCO_2 com base em parâmetros locais [2,4]. Em contrapartida extrema, o Cenário 3 (*Retrofit* Sustentável) demandou apenas 39,91 tCO_2, diferente dos cenários preliminares apresentados em trabalhos anteriores, onde se estimava uma emissão de 12,93 tCO_2, este estudo refinou a coleta de dados através de uma reanalise nos números utilizados de cada material e quanto eles se aplicam nessa etapa. Este resultado mostra que a eficiência no uso de materiais, gestão de resíduos e o processo de readequação permitem uma economia de aproximadamente 8% em relação ao cenário da construção nova (Cenário 1) e de aproximadamente 78,2% em relação ao cenário 2. Assim, o *retrofit* consolida-se como a alternativa de menor impacto ambiental, preservando o estoque de carbono preexistente e minimizando a introdução de novos materiais intensivos em CO_2 e quando comparado com outros estudos de ACV, como o de Scollaro [7], podemos perceber que cenários parecidos de

retrofit também podem gerar 39% menos de energia embutido que uma construção nova, mostrando outros benefícios além da diminuição do impacto do carbono embutido.

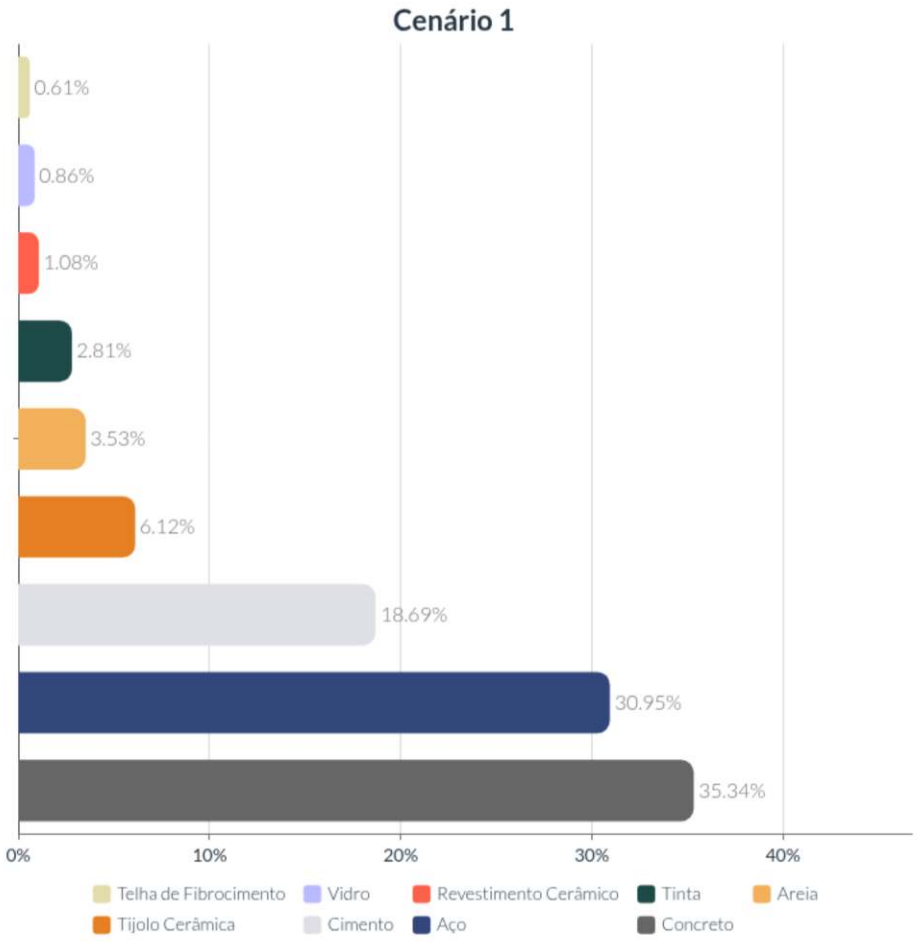
A figura 3 mostra a contribuição percentual de cada material de construção com a emissão de CO_2 embutido total dos cenários 1, 2 e 3.

Ao analisar criticamente a distribuição do carbono embutido por componente, observa-se que, nos Cenários 1 e 2, o trinômio estrutural – concreto, aço e cimento – responde por cerca de 85% do impacto, essa concentração converge com os achados de Tavares e Bragança (2016) [2], os quais reiteram a elevada intensidade carbônica da matriz de cimento nacional. No cenário 3, ocorre um fenômeno inverso de transição de impacto onde a preservação da estrutura preexistente elimina a necessidade de grandes quantidades de insumos de alta energia incorporada, deslocando o gargalo ambiental para as tecnologias de eficiência e fechamentos. O painel fotovoltaico isoladamente representou 40,60% das emissões do cenário de *retrofit*, seguido pelo cimento, com 21,32% e o tijolo cerâmico, 13,98%, para readequações espaciais.

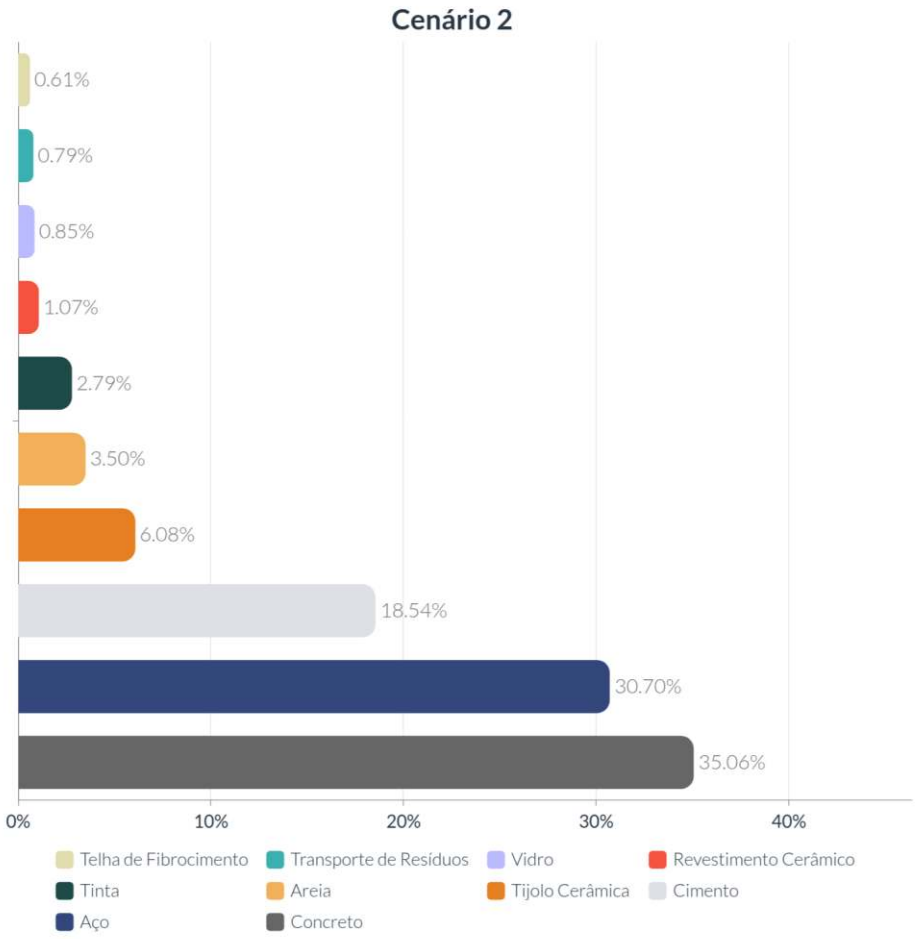
Essa inserção na matriz de impactos, onde sistemas tecnológicos superam os estruturais, é corroborada por resultados globais de *retrofit* de baixo carbono. Embora componentes fotovoltaicos e membranas poliméricas de fachadas verdes possuam um "pico" de emissão na fase A1-A3 devido aos processos metalúrgicos e químicos complexos de fabricação, alinhados aos dados globais do IPCC [5], seu tempo de retorno de carbono é amortizado nos primeiros anos da fase operacional. Comparando com a análise biofílica de Ottelé et al (2011) [6], o uso de infraestruturas verdes nesse estudo, cobertura e fachada verde, demonstrou impacto residual de carbono embutido desprezível na fase pré-operacional, 5,43% e 4,29% respectivamente, validando o uso de barreira ecológicas passivas como soluções de altíssimo ganho térmico e baixo impacto inicial. Portanto, os resultados ratificam que o reuso do estoque edificado transcende a preservação histórica, consolidando-se como ferramenta de engenharia climática de rápida resposta para a mitigação de GEE a curto prazo.

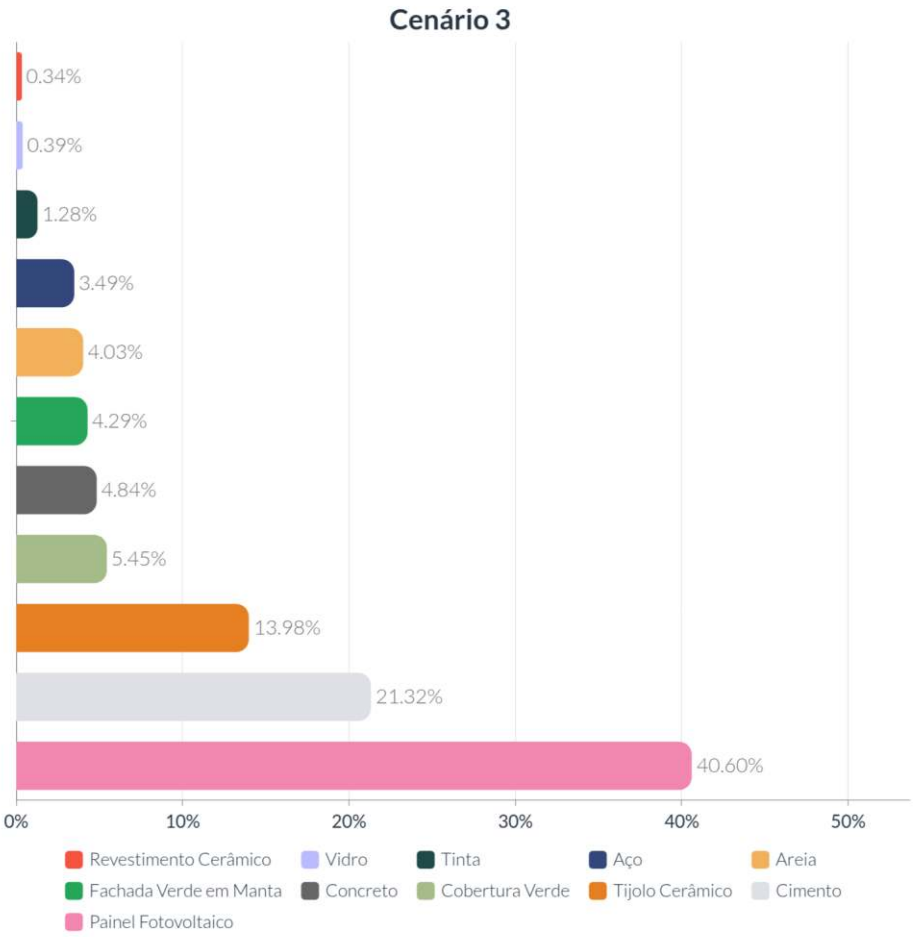
Figura 3: Emissões de CO_2 embutido dos materiais do cenário 1, cenário 2 e cenário 3

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8829



DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8829





Fonte: os autores.

Quando consideramos a emissão de CO_2 embutido do cenário 3 as inciativas de retrofit impactam com aproximadamente 50,34% das emissões. Isso mostra que, em cenários de reabilitação biofílica, o impacto das tecnologias de mitigação supera o dos materiais de construção convencionais, uma vez que a maior parte da massa bruta da edificação já se encontra estocada e não gera novas emissões.

CONCLUSÕES

O presente estudo demonstrou quantitativamente que o *retrofit* sustentável configura-se como uma estratégia prioritária e altamente eficaz para a descarbonização do ambiente construído, consolidando-se como uma alternativa substancialmente superior aos modelos tradicionais de demolição e reconstrução. Os dados obtidos ratificam que o maior vetor de sustentabilidade e mitigação climática na construção civil reside na manutenção e retenção da energia embutida nos sistemas estruturais e de vedação já consolidados.

A análise comparativa revelou que a preservação da estrutura preexistente associada a intervenção de readequação (Cenário 3) demandou uma emissão de apenas 39,91

tCO_2, esse montante representa uma redução drástica de aproximadamente 78% no impacto ambiental quando comparado ao cenário de uma construção nova equivalente e uma economia de 78,2% em relação ao cenário de demolição e obra nova.

Ademais, o estudo identificou uma importante inversão na matriz tradicional de impactos ambientais, enquanto construções novas concentram cerca de 85% de suas emissões em materiais convencionais, como concreto, aço e cimento, o cenário de *retrofit* direciona mais de 50% do impacto total para a introdução de tecnologias de alto desempenho e soluções biofílicas, com destaque para os painéis fotovoltaicos responsáveis isoladamente por 40,6% desse subtotal. Embora novas tecnologias de mitigação apresentem um ônus carbônico inicial relevante na fase de produção, o balanço sistêmico operacional justifica amplamente sua aplicação devido ao potencial de zerar consumo energético da rede por meio de geração de energia limpa ao longo do ciclo de vida do edifício.

Como contribuição prática e teórica, o estudo de caso desenvolvido em Joinville-SC comprova que a transformação de edifícios abandonados em modelos de arquitetura resiliente é capaz de converter passivos urbanos em ativos de baixo carbono. Os indicadores gerados, baseados na intensidade carbônica da matriz industrial brasileira, oferecem subsídios robustos para a tomada de decisão em projeto de reabilitação urbana e políticas públicas de sustentabilidade.

Como limitações cientificas, aponta-se que a fronteira de sistema desta pesquisa restringiu-se aos estágios pré-operacionais, do “berço ao portão”, A1-A3 conforme a EN 15978 [1], omitindo as dinâmicas de manutenção, substituição e descarte final, fases B e C. Diante disso recomenda-se para trabalhos futuros uma expansão da fronteira metodológica, realizando uma Avaliação de Ciclo de Vida completa e uma validação e refinamento do inventário, através de uma integração da modelagem a softwares de ACV comerciais utilizando bases de dados globais adaptados ao cenário de eco intensidade brasileiro.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Universidade Federal do Paraná pelo suporte acadêmico e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil pelo fomento à pesquisa em tecnologia do ambiente construído.

DECLARAÇÃO

Durante a preparação deste artigo, o primeiro autor utilizou a ferramenta Gemini na versão plus e o programa Consensus na sua versão gratuita para revisão, interpretação de dados, identificar as pontuações indicadas nas revisões pedidas e para verificar se o texto está coeso e sem muitas repetições.

REFERÊNCIAS

[1] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 15978: Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method. Brussels: CEN, 2011.

[2] TAVARES, S. F.; BRAGANÇA, L. Índices de CO2 para materiais de construção em edificações brasileiras. In: SBE16 BRAZIL & PORTUGAL, 2016, Vitória. Proceedings [...] Vitória: 2016. p. 927-936.

[3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12721: Avaliação de custos unitários de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edifícios. Rio de Janeiro, 2006.

[4] JORNALISMO CVJ. Comissão debate demolição de imóveis abandonados e desafios para ações municipais. Câmara de Vereadores de Joinville, ago. 2025.

[5] IPCC. Cimate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Gruoup III to the Sixth Assessment Report of The Intergovernmental Panel on Climate Change. [S.I]: Cambridge University Press, 2022.

[6] OTTELÉ, M.; PERINI, K.; FRAAIJ, A.; HAAS, E.; MAGLIOCCO, A. Comparative life cycle analysis for greening systems of building envelopes. Journal of Cleaner Production, v. 19, n. 4, p. 345-352, 2011.

[7] SCOLLARO, T. P., TEIXEIRA, A., GHISI, E., & TAVARES, S. F. (2022). Energia embutida: Análise dos impactos do retrofit de um edifício comercial no ciclo de vida energético. Anais do XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC 2022).