



SIMULAÇÃO E MITIGAÇÃO DA PEGADA DE CARBONO PROVENIENTE DE MATERIAIS CONSTRUTIVOS CONVENCIONAIS E SUBSTITUIÇÃO POR MATERIAIS ALTERNATIVOS

Tamara de Lima Oliveira¹
Ricardo Brauer Vigoderis²
Ana Marisa Silva de Albuquerque³
João Manoel da Silva⁴
Cristiane Guiselini⁵

RESUMO

Objetivo: O objetivo foi analisar quais impactos ao meio ambiente, provenientes da construção de residenciais, realizando uma simulação da pegada de carbono desse empreendimento e elaborando um comparativo com a substituição de materiais convencionais para materiais alternativos na mitigação de Dióxido de carbono (CO₂).

Referencial Teórico: A contribuição efetivamente da indústria da construção civil na emissão dos GEE, devido extração de materiais, transporte dos mesmos e processo de fabricação do cimento. O setor é encarregado pela produção de um bem que possui uma longa vida útil, assim, é possível perceber que a emissão dos gases tem um papel crítico ao meio ambiente

Método: A metodologia foi dividida nas seguintes etapas: pesquisa bibliográfica, com ênfase nos temas; coleta de dados, que foram levantados a partir de trabalhos em campo e a utilização de geoprocessamento com dados oriundos do sensoriamento remoto; análise dos impactos ambientais e o comparativo de materiais convencionais para materiais alternativos.

Resultados: Comprovou-se nos resultados dos materiais construtivos que, comparando os valores de 212,83 kgCO₂ e 208,14 kgCO₂, respectivamente, de CO₂ emitido pelos cinco materiais escolhidos, chegou-se a um total de redução de 4,69 kgCO₂, ou seja, o equivalente a 2,2% a menos de CO₂ emitido por cada casa, se substituídos as telhas cerâmicas e os tijolos cerâmicos por bambu.

Implicações da pesquisa: Os resultados deste trabalho são de grande relevância para o desenvolvimento sustentável na construção civil, não só apenas do município de Garanhuns, mas em todo Agreste meridional, trazendo para o interior de Pernambuco possibilidades de mitigar as emissões de gases.

Originalidade/valor: Utilizando o conhecimento técnico e as emissões dos materiais construtivos utilizados no Brasil, espera-se contribuir de forma relevante para a problemática que se apresenta, pois a construção civil como um todo, necessita de mudanças em sua forma de emitir gases do efeito estufa, já que é um setor com um alto potencial de mitigar os efeitos causados pelas emissões de GEE emitidos pelos seus materiais construtivos.

Palavras-chave: Emissão, Construção Civil, Dióxido de Carbono, Materiais de Construção.

¹ Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFPE), Recife, Pernambuco, Brasil.
E-mail: tamaaraoliveira@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5124-3772>

² Universidade Federal do Agreste de Pernambuco (UFPE), Boa Vista, Garanhuns, Pernambuco, Brasil.
E-mail: ricardo.vigoderis@ufape.edu.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8775-972X>

³ Autarquia do Ensino Superior de Garanhuns (AESGA), Pernambuco, Brasil.
E-mail: anamarisaeng@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-9682-0495>

⁴ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas, Campus Santana do Ipanema, Alagoas, Brasil.
E-mail: agrobio.jm@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7654-5475>

⁵ Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil.
E-mail: cristiane.guiselini@ufrpe.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2909-9502>



SIMULATION AND MITIGATION OF THE CARBON FOOTPRINT FROM CONVENTIONAL CONSTRUCTION MATERIALS AND REPLACEMENT WITH ALTERNATIVE MATERIALS

ABSTRACT

Objective: The objective was to analyze the impacts on the environment from residential construction, carrying out a simulation of the carbon footprint of this project and drawing up a comparison with the replacement of conventional materials for alternative materials in Carbon dioxide (CO₂) mitigation.

Theoretical Framework: The effective contribution of the construction industry to GHG emissions, due to the extraction of materials, their transportation and the cement manufacturing process. The sector is responsible for producing a good that has a long useful life, so it is possible to see that gas emissions play a critical role in the environment.

Method: The methodology was divided into the following stages: bibliographical research, with emphasis on themes; data collection, which were collected from field work and the use geoprocessing with data from remote sensing; analysis of environmental impacts and comparison of conventional materials to alternative materials.

Results: It was confirmed in the results of the construction materials that, comparing the values of 212.83 kgCO₂ and 208.14 kgCO₂, respectively, of CO₂ emitted by the five materials chosen, a total reduction of 4.69 kgCO₂ was achieved, that is, the equivalent of 2.2% less CO₂ emitted by each house, if ceramic tiles and ceramic bricks were replaced with bamboo.

Research implications: The results of this work are of great relevance for sustainable development in civil construction, not only in the municipality of Garanhuns, but throughout the Southern Agreste, bringing possibilities to mitigate gas emissions to the interior of Pernambuco.

Originality/value: Using technical knowledge and emissions from construction materials used in Brazil, it is expected to contribute in a relevant way to the problem that arises, as civil construction as a whole, requires changes in the way it emits greenhouse gases, as it is a sector with a high potential to mitigate the effects caused by GHG emissions emitted by its construction materials.

Keywords: Emission, Construction, Carbon Dioxide, Construction Materials.

SIMULACIÓN Y MITIGACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DE MATERIALES CONSTRUCTIVOS CONVENCIONALES Y REEMPLAZO POR MATERIALES ALTERNATIVOS

RESUMEN

Objetivo: El objetivo fue analizar qué impactos al ambiente, provenientes de la construcción de viviendas residenciales, realizar una simulación de la huella de carbono de esta empresa y trazar una comparación con la sustitución de materiales convencionales por materiales alternativos en la mitigación del dióxido de carbono (CO₂).

Referencias teóricas: La contribución real de la industria de la construcción en la emisión de GEI, debido a la extracción de materiales, el transporte de los mismos y el proceso de fabricación de cemento. El sector es responsable de la producción de un bien que tiene una larga vida útil, por lo que es posible percibir que la emisión de gases tiene un papel crítico para el medio ambiente

Método: La metodología se dividió en las siguientes etapas: investigación bibliográfica, con énfasis en temas; recolección de datos, los cuales fueron encuestados a partir de trabajo de campo y el uso de geoprocésamiento con datos de teledetección; análisis de impactos ambientales y la comparación de materiales convencionales para materiales alternativos.

Resultados: Se comprobó en los resultados de los materiales de construcción que, comparando los valores de 212,83 kgCO₂ y 208,14 kgCO₂, respectivamente, de CO₂ emitido por los cinco materiales elegidos, se logró una reducción total de 4,69 kgCO₂, es decir, el equivalente a un 2,2% menos de CO₂ emitido por cada vivienda, si las baldosas cerámicas y los ladrillos cerámicos fueron sustituidos por bambú.



Implicaciones de la investigación: Los resultados de este trabajo son de gran relevancia para el desarrollo sostenible en la construcción civil, no solo en el municipio de Garanhuns, sino en todo el sur de Agreste, trayendo al interior de Pernambuco posibilidades de mitigar las emisiones de gases.

Originalidad/valor: Utilizando los conocimientos técnicos y las emisiones de los materiales de construcción utilizados en Brasil, se espera que contribuya de manera relevante al problema que se presenta, ya que la construcción civil en su conjunto, necesita cambios en su forma de emitir gases de efecto invernadero, ya que es un sector con un alto potencial para mitigar los efectos causados por las emisiones de GEI emitidas por sus materiales de construcción.

Palabras clave: Emisión, Construcción, Dióxido de Carbono, Materiales de Construcción.

RGSA adota a Licença de Atribuição CC BY do Creative Commons (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



1 INTRODUÇÃO

No contexto atual, as mudanças climáticas e a expansão urbana emergem como desafios prementes do século XXI, convergindo de maneiras potencialmente perigosas para o planeta. A significativa contribuição das cidades para o aquecimento global destaca a urgência de estratégias eficazes de mitigação e adaptação (Sethi, 2017). Nesse cenário, as atividades antrópicas desempenham um papel crucial, divididas entre: mitigação, o esforço para prevenir e reduzir emissões responsáveis pelas mudanças climáticas; e adaptação, a busca por métodos para enfrentar os efeitos adversos já presentes (AdaptaClima, 2023).

O material trabalhado é retirado do meio ambiente, movimentando a matéria-prima e gerando resíduos de volta a natureza. Segundo John (2000) a construção civil é a principal consumidora de matéria prima advinda de fontes naturais e uma das maiores geradoras de resíduos, é também a maior consumidora de energia ao extremo, afeta o meio de forma significativa, colabora com grande parcela da poluição ambiental favorecendo o aumento do efeito estufa. Atualmente, a tendência do setor cimentício brasileiro consiste em promover a eficiência energética das máquinas e equipamentos, na tentativa de contribuir com a redução de emissões (Visedo & Pecchio, 2019).

O relatório AR6 do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021) destaca um elevado índice de emissão de dióxido de carbono entre 2016 e 2020, reacendendo debates sobre a necessidade de mitigar as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). A urbanização, identificada como um dos principais fatores contribuintes para essas emissões (Muñoz, Zwick & Mirzabaev, 2020), não apenas impacta diretamente a emissão de GEE, mas também se entrelaça com a produção e consumo de materiais de construção civil, intensificando os desafios ambientais.



A produção desses materiais, exemplificada pela queima de combustíveis fósseis, decomposição térmica do calcário e a extração muitas vezes ilegal de madeira nativa (Agopyan & John, 2011), evidencia as complexas interações entre atividades humanas e impactos ambientais. Este trabalho, focado na simulação e mitigação da pegada de carbono em condomínios residenciais em áreas urbanas, surge como resposta a esses desafios, procurando integrar abordagens sustentáveis no cenário da urbanização.



2 REFERENCIAL TEÓRICO

A maioria dos materiais utilizados na construção civil é obtida através das matérias-primas, dessa forma, esgotando os recursos naturais e ocasionando impactos no meio ambiente. Estima-se que o setor construtivo utiliza entre 40% e 70% dos recursos naturais (Russo, 2017).

A utilização de materiais na construção civil encontra-se relacionado a inúmeros problemas ambientais e urbanos. O aproveitamento da matéria-prima pode causar destruição ambiental, geração de resíduos e uma enorme liberação de gases na atmosfera.

A expansão urbana contribui para a degradação do equilíbrio do meio ambiente e da qualidade de vida dos habitantes que vivem nas cidades; logo, são necessárias ações que mantenham a austeridade entre o processo humano e a conservação dos meios naturais e sua cobertura vegetal, levando em consideração seus benefícios ecossistêmicos e paisagísticos (Dantas, 2017).

Em países que se encontram em desenvolvimento como o Brasil, o processo de urbanização é evidenciado, logo exigindo uma demanda de gestões territoriais que tornem o processo evidente. A presente de problemas no transporte, saneamento, energia, segurança, moradia e outros se faz presente em crise socioambiental emergente (Locatelli, Bernardis & Amaral, 2020).

Globalmente, observa-se mobilizações em enfrentamento de transformações que se apresentam ao cenário atual predatório em várias frentes, incluindo a mobilidade urbana. A elaboração dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) pela Organização das Nações Unidas (ONU, 2015) indica a posição dos acordos globais, que nem sempre produzem um efeito esperado, na composição de agendas que contemplam ações de planejamento de políticas públicas por meio das propostas alvos.

A Organização das Nações Unidas (ONU), junto com parcerias brasileiras, trabalha para atingir os ODS. Ao todo são 17 objetivos audaciosos e conectados entre si que tratam dos principais desafios de desenvolvimento humanitário no Brasil e no mundo. As ODS são uma invocação global a ação para erradicar a pobreza, preservar o meio ambiente e o clima, garantindo à população mundial que possa desfrutar de paz e prosperidade. Os objetivos para os quais as Nações Unidas estão em contribuição para atingir a Agenda 2030 no Brasil (Estratégias ODS, 2018).

O Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 11 apresenta metas para tornar os centros urbanos e assentamentos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis. É de extrema



importância que ocorra um desdobramento nas ações e que seu direcionamento esteja inserido no processo de definição de políticas públicas (Locatelli *et al.*, 2020).

Até 2030: garantir o acesso de todos à habitação segura, adequada e a preço acessível, e aos serviços básicos e urbanizar as favelas, proporcionar o acesso a sistemas de transporte seguros, acessíveis, sustentáveis e a preço acessível para todos, melhorando a segurança rodoviária por meio da expansão dos transportes públicos, com especial atenção para as necessidades das pessoas em situação de vulnerabilidade, mulheres, crianças, pessoas com deficiência e idosos, aumentar a urbanização inclusiva e sustentável, e as capacidades para o planejamento e gestão de assentamentos humanos participativos, integrados e sustentáveis, em todos os países (ONU, 2015).

Reduzir o impacto ambiental negativo per capita das cidades, inclusive prestando especial atenção à qualidade do ar, gestão de resíduos municipais e outros, proporcionar o acesso universal a espaços públicos seguros, inclusivos, acessíveis e verdes, particularmente para as mulheres e crianças, pessoas idosas e pessoas com deficiência (ONU, 2015).

Dessa forma, a busca por materiais de baixo carbono, com desempenho e durabilidade satisfatórios, deve ser mais incentivada. Materiais como madeira, bambu, fibras naturais e coberturas verdes são de fonte natural, de origem renovável e capazes de sequestrar CO₂ (Caldas, 2020). O uso desses materiais é apontado como capaz de diminuir as emissões dos gases do efeito estufa, pois, por serem menos processados, tornam-se melhores, priorizando o uso de materiais naturais facilmente absorvidos no ambiente.

Além dos materiais, existem técnicas que reduzem a pegada de carbono na edificação. Tais estratégias reduzem os impactos em uma construção, incluindo o uso de energia renovável (solar, eólica), a captação de água da chuva e o uso de telhado verde (Boni & Meira, 2020).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Na presente pesquisa, realizou-se análises nos locais de estudo, averiguando fatores antropogênicos e o meio natural na cidade de Garanhuns, em Pernambuco. As análises se dispuseram por meio de mapeamentos da redução da cobertura vegetal após a construção de empreendimentos residenciais, que implicam na disseminação de gases de efeito estufa através da construção civil.

A natureza dessa pesquisa foi classificada como aplicada, a qual tem como objetivo a geração de alicerces fundamentados para aplicação de soluções para problemas singulares. Do



ponto de vista técnico, a pesquisa é exploratória, visando proporcionar informações sobre um assunto preliminar, facilitando um novo entendimento sobre o tema (Prodanov & Freitas, 2013).

A pesquisa foi dividida nas seguintes etapas: pesquisa bibliográfica, coleta de dados, análise dos impactos ambientais oriundos da construção civil, simulação da pegada de carbono das áreas estudadas, comparação com alternativas construtivas mais sustentáveis e com a implementação de energias renováveis nos empreendimentos.

O ODS 11 tem como objetivo principal tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis. Para tornar uma cidade sustentável, é necessário dispor de alternativas que preservem a qualidade de vida humana e o meio ambiente simultaneamente. Readaptar o formato que os centros urbanos se desenvolvem é de suma importância para mitigar os impactos ambientais e consequentemente o esgotamento dos meios naturais (ONU, 2015).

A revisão de literatura foi fundamental para a elaboração de quadros de materiais construtivos e sua pegada de carbono equivalente a partir de valores médios encontrados. Para esta pesquisa, foi exemplificada a emissão de dióxido de carbono de cinco materiais: alumínio, aço, madeira, material cerâmico e concreto. Com base nas bibliografias existentes, tornou-se possível estimar quanto de CO₂ o modelo de unidade familiar emite.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS LOCAIS DE ESTUDO

Para a análise da caracterização do local de estudo, realizou-se um mapeamento da redução da cobertura vegetal após a construção dos Residenciais Antônio Cordeiro e Residencial São Vicente I e II. Para avaliar a redução da cobertura vegetal, realizou-se um levantamento de imagens coletadas do *Google Earth Pro*, que captura essas imagens do satélite Landsat 8 da NASA. Elaborou-se um comparativo dessas imagens em anos distintos (2010, 2016 e 2023) para uma análise anterior e posterior à construção dos residenciais.

O município de Garanhuns está situado na região Nordeste do Brasil, no Agreste Meridional de Pernambuco, entre as latitudes 08° 50' 0''S e longitude 36° 40' 0''W, englobando uma área total de 458,552 km² (IBGE, 2020). Localiza-se no Planalto da Borborema, onde se destaca a diferenciação do sistema climático de seu entorno. A uma altitude entre 850 e 1.030 m, seu entorno e perímetro possuem um clima do tipo mesotérmico do tipo Csa, com chuvas no outono e inverno. A média anual de temperatura fica em torno de 20°C. No inverno, pode chegar a menos de 17°C, com a mínima de 10°C, e no verão chega a atingir 36°C (Azambuja & Barros, 2015).



A área do Planalto da Borborema, onde Garanhuns está localizada, sofreu diversos desequilíbrios geomorfológicos e incisões sobre seu relevo, que são observados no entorno da cidade. Esses processos originam oscilações climáticas (Azambuja & Barros, 2015).

Garanhuns possui uma cobertura vegetal de transição. Se observado ao longo da história da região, a sua porção barlavento inicialmente era revestida de Mata Atlântica, e a sotavento era composta predominantemente da caatinga arbórea hipoxerófila. De forma mais atualizada, apenas existem vestígios dessas coberturas (Melo & Souza, 2015).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os residenciais escolhidos foram construídos nos arredores da cidade de Garanhuns. Os três apresentam analogias em sua composição e também no que diz respeito à remoção de cobertura vegetal. Os locais onde estão situados os três residenciais representam um somatório total de 762.373 metros quadrados de área construída, equivalente a 0,17% da área construída de Garanhuns. Evidencia-se uma expressiva remoção de área verde no local. A cobertura vegetal foi reduzida ao longo dos anos, especialmente na área dos residenciais e em seus arredores, provocada pela expansão habitacional. Para este levantamento, analisou-se a área dos residenciais em três anos distintos: 2010, 2016 e 2023.

A escolha desses anos deveu-se à iniciação das construções no local, que teve início no ano de 2012 até os dias atuais. As edificações civis geralmente apresentam um longo ciclo de vida, e as emissões de carbono geradas durante sua execução representam cerca de 75%. O nível de mercantilização e gastos de consumo social intensificam as emissões de carbono das construções civis (Wang *et al.*, 2022). Se for reduzida, a absorção de CO₂, devido à redução da vegetação nativa, pode desencadear inúmeros efeitos nocivos ao meio ambiente, como a elevação da temperatura, mudanças nos padrões climáticos e ausência de biodiversidade originária do local.

4.1 COMPARATIVO DE EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA DE MATERIAIS CONSTRUTIVOS

O método mais comum para estimar emissões é combinar informações em toda a extensão em que uma atividade humana se desenvolve, denominada dados de atividades pelo IPCC, com coeficientes que quantificam as emissões ou remoções de Gases de Efeito Estufa (GEE) por unidade de atividade, conhecidos como fatores de emissão (FE) (IPCC, 2006).



Assim, a equação desenvolvida pelo IPCC que representa o cálculo de emissões é a seguinte, conforme a Equação 01:

$$\text{Emissões} = \text{DA} \times \text{FE}$$

Onde:

DA = Dados de atividades

FE = Fatores de emissão

Os cálculos estruturais são realizados em softwares que sincronizam informações com projetos arquitetônicos, planilhas gerenciais de controle de materiais e suprimentos, sempre que uma alteração seja necessária. Uma ferramenta difundida e requerida em obras públicas consiste no BIM (*Building Information Modeling*) como o Revit, cuja funcionalidade importante é a listagem de materiais detalhada, produzida após a compatibilização dos projetos.

Informações sobre os materiais aplicados a uma construção, distâncias relativas ao transporte de mercadorias e fornecedores, levantamentos e custos de energia produzem estimativas do quantitativo de emissões de dióxido de carbono. No entanto, para este projeto, foram consideradas apenas as emissões dos materiais escolhidos.

A massa de dióxido de carbono gerada pelos materiais comumente utilizados em uma obra varia de acordo com características inerentes aos mesmos. A análise da literatura permitiu a obtenção de números e concentração de dados em forma de tabelas, que serão discutidas e apresentadas neste capítulo.

A bibliografia apresenta um rico material que discorre sobre a emissão de dióxido de carbono para os materiais da construção civil, tanto no Brasil como em outros países. O estudo bibliográfico realizado possibilitou a obtenção do CO₂ médio específico para os materiais: alumínio, concreto, madeira, aço e material cerâmico. A tabela 1 apresenta os valores individuais obtidos, a média aritmética calculada e a respectiva referência.

Tabela 1

Emissões de CO₂ relacionado aos tipos de materiais escolhidos

MATERIAL	FEI/ kg CO ₂ / kg	MÉDIA	BIBLIOGRAFIA
Alumínio Geral	4,441	6,36	Costa (2012)
	4,44		Tavares (2006)
	10,19		Tavares & Braganca (2016)



Concreto	0,12	0,25	Tavares & Braganca (2016)
	0,480		Costa (2012)
	0,14		Costa (2012)
Madeira	0,496	0,42	Costa (2012)
	0,358		Cunha (2016)
	0,405		Costa (2012)
Aço	1,900	1,38	Martins (2020)
	0,550		Martins (2020)
	1,700		Instituto Aço Brasil (2020)
Material Cerâmico	0,333	0,44	Freitas (2017)
	0,222		Kozloshi, Vaggetti, e Silva (2019)
	0,760		Schuster, Hipolito, Taboni, Knaut, e Correia (2019).

Fonte: autoria própria (2023)

Com base na literatura nacional, os dados apresentados na Tabela 1 consideram diferentes fases executadas na obra. Ao analisar o quantitativo dos materiais escolhidos nesta pesquisa, bem como suas unidades equivalentes, foi possível estimar as emissões de dióxido de carbono da unidade habitacional modelo aqui apresentada. A média encontrada, que representa cada grupo, destaca o alumínio como o maior emissor de CO₂, emitindo 6,36 kgCO₂, em seguida, o aço com 1,38 kgCO₂, materiais cerâmicos, 0,44 kgCO₂, madeira, 0,42 kgCO₂ e, por fim, o concreto, representando 0,25 kgCO₂.

É necessário ter conhecimento prévio sobre materiais construtivos e suas emissões de carbono para elaborar estratégias mitigatórias durante o processo de execução da obra, desde o projeto até a etapa de acabamento.

O quadro Inventory of Carbon & Energy (ICE), com dados atualizados de 2019, contém as quantificações necessárias para a elaboração de inventários de carbono incorporado de diversos materiais construtivos. As emissões incorporadas levam em consideração a extração, fabricação, instalação dos materiais e transporte (Jones, 2023).

Tabela 2

Dados do inventário de Carbono e Energia (ICE)

MATERIAIS	CARBONO INCORPORADO KGCO ₂ /KG
Alumínio Geral	6,67
Aço	3,02
Madeira	0,400
Material Cerâmico	0,179
Concreto Geral	0,138

Fonte: Jones (2019)



Comparando as emissões de CO₂ da literatura do Reino Unido (Tabela 2) com os valores encontrados pela literatura nacional (Tabela 1), chegou-se à conclusão de que tanto o alumínio, representado no Quadro do Reino Unido (que apresentou 6,67 kgCO₂/kg), quanto o concreto (0,138 kgCO₂/kg), ao serem comparados com a literatura nacional, onde o alumínio apresenta 6,36 kgCO₂/kg e o concreto 0,25 kgCO₂/kg, são os maiores geradores de CO₂ entre os materiais escolhidos para esta pesquisa.

Com o auxílio do *software* Revit, que é uma plataforma que utiliza a tecnologia BIM consegue-se modelar e identificar espessuras necessárias ao traçado em cortes e vistas, realizar mudanças de escalas, quantificar e desenvolver documentos dos processos dos projetos de engenharia e arquitetônicos. Dentre outros benefícios, pode-se incluir a simulação, a análise, a avaliação e o gerenciamento de informações Justi, (2008) e Oliveira, (2020). Para Santos *et al.* (2023), o BIM também é utilizado com a finalidade de estimar quantitativos de resíduos da construção civil.

Assim, foi possível elaborar a tabela 3 com o consumo descritivo dos mesmos materiais utilizados nas tabelas 1 e 2, porém com as quantidades empregadas no modelo de unidade habitacional.

Tabela 3

Materiais utilizados no modelo de residência estudada

CONSUMO DESCRITIVO	QUANTIDADE	UNIDADES
Concreto	4,35	m ³
Alumínio Geral	11	m ²
Material Cerâmico (tijolos e telhas)	202 + 385	m ²
Aço	2.368	m
Madeira, Madeira de porta comum e Madeira de porta branca	75 + 27 + 18	m ²

Fonte: autoria própria (2023)

4.2 CÁLCULO DE LANÇAMENTO DO GEE PARA PEGADA DE CARBONO

A contabilização das emissões não incluiu atividades administrativas, escavações ou movimentações do solo. Com a finalidade de identificar lançamentos de CO₂ na área de estudo, foi fundamental investigar a quantidade de materiais utilizada na obra. A princípio, utilizou-se a equação 1, onde o consumo de material (Q), em unidades de massa (no caso da proposta do residencial modelo, esse valor foi obtido pelo Revit), é multiplicado pelos valores médios obtidos na literatura, denominados Fator de Emissão Individual (FEI).

Para a geração de kg de CO₂ por cada unidade dos itens analisados, essa equação também foi empregada nas pesquisas de Freitas (2017), Rosa (2018) e Albuquerque (2021). Ao



combinar essas duas fontes de informação com base na fórmula do IPCC, as emissões de gases de efeito estufa da pesquisa apresentada são calculadas da seguinte maneira, conforme a Equação 02:

$$EmCO_2 = Q \times FEI$$

Onde:

$EmCO_2$ = Emissão de CO_2 estimada

Q = Consumo de material

FEI = Fator de emissão individual

Para Freitas (2017), Rosa (2018) e Albuquerque (2021), essa equação pode ser modificada, dependendo das circunstâncias em que ela é aplicada, para incluir outros parâmetros de estimação além de um fator de emissão único. A Equação 1, baseada no IPCC, destina-se a calcular a quantidade de emissão de cada material individualmente, adotando o fator de lançamento médio obtido após levantamento de dados bibliográficos.

Tabela 4

Emissões de CO_2 aos materiais aplicados a proposta de residência

CONSUMO DESCRITIVO	QUANTIDADE	UNIDADE	Kg/ CO_2 /Unidade	TOTAL (Kg CO_2)
Concreto	4,35	m ³	0,25	10,875
Alumínio Geral	11	m ²	6,36	69,96
Material Cerâmico (tijolos e telhas)	587	m ²	0,44	258,28
Aço	2.368	m	1,38	3.267,84
Madeira Geral	120	m ²	0,42	50,4
EMIÇÃO TOTAL (Kg de CO_2)				14.521,48
EMIÇÃO TOTAL POR ÁREA CONSTRUÍDA (Kg de CO_2/m²)				212,83

Fonte: autoria própria (2023)

Para chegar ao valor total de emissão por área construída, representado na Tabela 4, que foi de 212,83 kg CO_2 , dividiu-se o valor total de emissão de 14.521,48 pelo valor da área construída da residência modelo, que é de 68,23 m². A emissão de CO_2 para a proposta modelo estudada equivale a 14.521,48 kg CO_2 , o que corresponde a 14,52 t CO_2 /m², correspondendo a 212,83 kg CO_2 por m² de área construída. Destaca-se que os materiais analisados são essenciais para uma obra habitacional popular e obtiveram taxas elevadas de geração de dióxido de carbono (Rosa, 2018; Freitas Júnior, 2017; Albuquerque, 2021).



Uma pesquisa sobre uma residência padrão de 80 m², composta por dois quartos, cozinha, sala, banheiro e área de serviço, resultou em um valor de 19 tCO₂/m². A estimativa correspondente ao cimento foi de 67 tCO₂ para cada m² construído, ao material cerâmico de 127 tCO₂, aço e agregados de 5 e 8 tCO₂, respectivamente. O fator de emissão relacionada foi de 237 kg por m² (Lima, Fernandez & Dantas, 2018).

O mesmo comparativo encontra-se sobre uma edificação no município de Garanhuns, de área construída de 1.194,93 m², sendo uma obra vertical em alvenaria, com cinco pavimentos, estimando 190 tCO₂/m². A estimativa corresponde ao aço (14,096 KgCO₂), cimento (87,750 KgCO₂), areia (1,29 KgCO₂), brita (0,57 KgCO₂) e materiais cerâmicos (84,480 KgCO₂). Seu fator de emissão relacionada foi de 159,37 kg por m² (Albuquerque, 2021).

Existe um padrão comercial brasileiro dos materiais indispensáveis para construção civil, que são: cal, cimento, aço, material cerâmico e os agregados. O autor obteve Fator de Emissão (FE) em termos de sacos de material, como cimento, areia e brita, estimando um total de 224 tCO₂/m², de uma casa de interesse popular construída no Paraná. O projeto previa uma unidade habitacional composta por dois quartos, cozinha, sala, banheiro e área de serviço (Stachera, 2006).

Comparando esses estudos, percebe-se uma semelhança quanto ao fator de CO₂ emitido, se comparados ao modelo de residência dessa pesquisa. Mesmo com alguns desses materiais distintos, o padrão comercial do Brasil possibilita estimar um quantitativo similar de emissões, por se tratar de residenciais que mantêm padrões construtivos semelhantes e utilizam materiais que são fundamentais para a construção civil (Stachera, 2006).

Em estudo sobre emissões de CO₂, empregam-se materiais alternativos na construção de uma Casa Popular Eficiente no Rio Grande do Sul, contendo uma área de 55,23 m², com parâmetros construtivos semelhantes ao modelo desta pesquisa, também com uma sala, cozinha, área de serviço, um banheiro e dois dormitórios (Kozloski *et al.*, 2019).

Os autores chegaram aos valores de redução de alguns dos materiais também empregados nesta pesquisa, como: o bloco de terra comprimida, que reduziu 29,5% das emissões de CO₂ quando comparado à quantificação com tijolos cerâmicos; o uso de telhas ecológicas que representou 61,3% menos emissões em relação às telhas de cerâmica. Esquadrias em madeira chegaram a ser 90,65% menor em comparação com as de alumínio Kozloski *et al.*, (2019). Investigou-se a substituição de 3 materiais construtivos convencionais por 3 materiais alternativos em uma habitação do Habitar Brasil de Ilhéus, na Bahia. A área é equivalente a 36,84 m² e apresenta 2 quartos, 1 cozinha e 1 banheiro. Os autores constatarem que



o uso de materiais alternativos diminui significativamente a emissão de CO₂, onde: o tijolo cerâmico emite 0,241 KgCO₂, porém, se substituído pelo bambu, chega ao valor de 0,00202 KgCO₂. A telha cerâmica, que representa 1,915 KgCO₂, se substituída pela taubilha de pequia, emitirá 0,604 KgCO₂. E a esquadria em alumínio, que emite 13,15 KgCO₂, substituída pela esquadria em madeira (cedro), pode chegar a um valor de 0,604 KgCO₂ (Jesus & Buonicontro 2020).

Usando como base os valores obtidos na pesquisa supramencionada, foram substituídos dois dos materiais desta pesquisa para uma avaliação de quanto seria a mitigação de CO₂ caso a residência modelo utilizasse materiais alternativos em sua construção, como mostra a Tabela 5 (Jesus & Buonicontro 2020).

Tabela 5

Substituição de materiais convencionas para alternativos

CONSUMO DESCRITIVO	QUANTIDADE	UNIDADE	Kg/CO ₂ /Unidade	TOTAL (KgCO ₂)
Concreto	4,35	m ³	0,25	10.875
Esquadrias em madeira (cedro)	11	m ²	0,604	6,64
Bambu	587	m ²	0,00202	1,19
Aço	2.368	m	1,38	3.267,84
Madeira Geral	120	m ²	0,42	50,4
EMISSION TOTAL (Kg de CO₂)				14.201,07
EMISSION TOTAL POR ÁREA CONSTRUÍDA (Kg de CO₂/m²)				208,14

Fonte: autoria própria (2023)

Considera-se o bambu também como revestimento de telhado. Em pesquisa, foram considerados materiais cerâmicos, o somatório de tijolos e telhas, justificando o uso de apenas um material para as duas finalidades de cobertura e vedação (Durante *et al.*, 2019).

Comparando os valores das tabelas 4 e 5 com os resultados de 212,83 kgCO₂ e 208,14 kgCO₂, respectivamente, chegou-se a um total de redução de 4,69 kgCO₂, ou seja, o equivalente a 2,2% a menos de CO₂ emitido por cada casa. Logo, faz-se necessário incentivar a produção de materiais mais duráveis do que os disponíveis atualmente no mercado, introduzindo-os na indústria construtiva. Deve-se utilizar materiais recicláveis e incorporá-los à produção.

Análises referentes à pegada de carbono em materiais construtivos carecem de estudos mais aprofundados e análises para mitigar os impactos ambientais oriundos das ocupações territoriais humanas. A convivência passiva com o meio ambiente e ecossistemas só é possível por meio da utilização de energias limpas e renováveis, captação de água da chuva, painéis fotovoltaicos, materiais construtivos reutilizáveis (fibras vegetais, bambus, palha, terra, linho), e aplicação maior de ventilação e iluminação naturais.



5 CONCLUSÃO

Durante a execução deste estudo, foi evidenciada a remoção significativa da cobertura vegetal nos empreendimentos pesquisados. Os três residenciais, totalizando 762.373 metros quadrados de área construída, correspondem a 0,17% da área construída de Garanhuns. Essa expressiva remoção de área verde ocorreu entre 2010 e 2023, período de construção dos residenciais. A proposta de compensação pelos métodos construtivos sustentáveis abordados, resultou em impactos positivos na pegada de carbono.

A partir do desenvolvimento da presente pesquisa, tornou-se possível inferir que a análise dos materiais construtivos revelou uma redução total de 4,69 kgCO₂ (2,2% a menos por casa) ao substituir telhas e tijolos cerâmicos por bambu. Destaca-se a necessidade de incentivos à produção de materiais mais duráveis e recicláveis na indústria construtiva. Para pesquisas futuras, recomenda-se o estímulo ao uso de materiais sustentáveis em levantamentos geotécnicos e topográficos, assim como estudos mais aprofundados sobre biodigestores residenciais, especialmente em casas populares do programa MCMV. Incentivos governamentais e políticas públicas são essenciais para intensificar essas práticas em empreendimentos futuros.

A viabilidade econômica dessas práticas sustentáveis, em relação ao custo/benefício e seus impactos positivos para moradores e meio ambiente, destaca-se como um ponto crucial. A implementação desses métodos em casas populares pode em breve tornar-se uma alternativa promovendo a captura de CO₂.

REFERÊNCIAS

- Albuquerque, A. M. S. (2021). Estimativas de emissão de CO₂ em uma edificação no município de Garanhuns – Pernambuco. (Trabalho de Monografia). AESGA. Garanhuns-PE.
- Adaptaclima. (2023). Adaptação à mudança climática. Disponível em: <http://adaptaclima.mma.gov.br/adaptacao-a-mudanca-do-clima>
- Agopyan, V., & John, V. M. (2011). O desafio da sustentabilidade na construção civil. Série Sustentabilidade, v. 5. São Paulo: E. Blucher.
- Azambuja, R. N., & Barros, A. C. (2015). Geomorfologia e áreas de expansão urbana do município de Garanhuns-PE: uma abordagem espaço-temporal dos eventos morfodinâmicos para o planejamento territorial. Geo UERJ. Disponível em: <https://doi.org/10.12957/geouerj.2015.16739>
- Boni, F., & Meira, S. (2020). Como reduzir a pegada de carbono na construção civil. Disponível em: <https://www.ugreen.com.br/como-reduzir-a-pegada-de-carbono-na-construcao-civil/>



- Caldas, L. R. (2020). Como as edificações podem reduzir sua pegada de carbono? Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/943513/como-as-edificacoes-podem-reduzir-sua-pegada-de-carbono>
- Costa, B. L. C. (2012). Quantificação das emissões de CO₂ geradas na produção de materiais utilizados na construção civil. 208f. Disponível em: http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_m/BrunoLuisDeCarvalhoDaCosta.pdf
- Cunha, I. B. (2016). Quantificação das emissões de CO₂ na construção de unidades residenciais unifamiliares com diferentes materiais. 136f. (Dissertação) Mestrado em Engenharia e Tecnologia dos materiais. Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Disponível em: https://tede2.pucrs.br/tede2/bitstream/tede/6884/2/DIS_IASMINY_BORBA_DA_CUNHA_COMPLETO.pdf
- Dantas, J. B. (2017). Geografia distribuição espacial e qualificação da cobertura vegetal do município de Natal, Rio Grande do Norte. Letras e Artes Programa de (Pós-Graduação e Pesquisa em Geografia Espacial). Universidade Federal do Rio Grande do Norte Centro de Ciências Humanas. Natal/RN.
- Durante, L. C., Alencar, S. G., Venere, P. C., Callejas, I. J. A., Rabelo, O. S., & Rossetti, K. de A. C. (2019). Coberturas ecológicas para aplicação em moradias dos assentamentos da reforma agrária: alternativas de ecoinovação. *E&S*. 41-61. DOI: [dx.doi.org/10.18607/ES201988148](https://doi.org/10.18607/ES201988148)
- Estratégia ODS. (2018). A Estratégia ODS é uma coalizão com o propósito de ampliar e qualificar o debate a respeito dos objetivos de desenvolvimento sustentável no Brasil. Disponível em: <https://www.estrategiaods.org.br/>
- Freitas J, J. A. (2017). Materiais de construção com madeira para mitigação de gases do efeito estufa na execução de edificações. 204f. (Tese de doutorado). Universidade Federal do Paraná, Paraná. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/49450/R%20-%20T%20-%20JOSE%20DE%20ALMENDRA%20FREITAS%20JUNIOR.pdf?sequence=1>
- IBGE. Atlas Geográfico Escolar. [Sl]., (2019). Disponível em: <https://atlas escolar.ibge.gov.br/a-terra/nosso-planeta-no-universo>
- Instituto Do Aço Brasil. *Emissão de gases de efeito estufa das empresas produtoras de aço no Brasil*. (2020). 18f. Disponível em: <https://www.acobrasil.org.br/relatoriodesustentabilidade/assets/pdf/PDF-2020-Relatorio-Aco-Brasil-Ambiental.pdf>
- IPCC. (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Intergovernmental Panel on Climate Change. Published: IGES, Japan.
- IPCC. (2021) Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Sumário para Tomadores de Decisão. In: Sexto Relatório de Avaliação. Genebra: IPCC.
- Jesus, C. D., & Buonicontro, L. (2020). Avaliação preliminar comparativa de materiais utilizados para construção de Habitações de Interesse Social na Costa do Cacao, BA. *Gaia Scientia*, 14(2).



- John, V. M. (2000). Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. (Tese). – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Jones, Craig. Inventory of Carbon & Energy (ICE). (2019). Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/491036852/ICE-DB-V3-0-10-Nov-2019-xlsx>
- Justi, A. R. (2008). Implantação da plataforma Revit nos escritórios brasileiros. *Gestão & Tecnologia de Projetos*, 3(1), 140-152 Disponível em: [file:///C:/Users/Usuario/Downloads/50931-Artigo%20\(manuscrito%20de%20submiss%C3%A3o%20inicial\)-63396-1-10-20130204%20\(4\).pdf](file:///C:/Users/Usuario/Downloads/50931-Artigo%20(manuscrito%20de%20submiss%C3%A3o%20inicial)-63396-1-10-20130204%20(4).pdf)
- Kozloshi, C. L., Vaghetti, M. A., & Silva, B. N. (2019). Emissões de CO₂ na casa popular eficiente e o emprego de materiais alternativos. p. 1-11 In: *III Encuentro Latino Americano Y Europeo de Edificaciones Y Comunidades Sostenibles*. Santa Fé - Paraná.
- Leite, G. S., Vigoderis, R., Cruz Gonzaga, N., De Lucena Rocha, L., Da Silva, J. M., Pachêco, C. R. X., & Oliveira, L. T. (2023). A Gestão de resíduos da construção civil em um empreendimento urbano usando a tecnologia BIM. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, v. 17, n. 9, p. 01-09. Disponível em: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v17n9-009>
- Lima, E. M., Fernandes, R. T. V., & Dantas, L. (2018). Quantificação de CO₂ emitido decorrente dos materiais empregados na construção de uma residência unifamiliar. In: *Congresso Técnico Científico de Engenharia e da Agronomia*, Maceió – Alagoas. Disponível em: https://www.confea.org.br/sites/default/files/antigos/contecc2018/civil/171_qdceddmencdu.pdf
- Locatelli, I. P. V, Bernardinis, M. A. P., & Amaral, M. M. (2020). Uma aproximação entre as políticas públicas de mobilidade urbana e os objetivos de desenvolvimento sustentável em Curitiba-PR. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, 9(1), 16850, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5585/geas.v9i1.16850>
- Martins, R. (2020). Grupo NLMK reduz em 4% emissões de CO₂ por tonelada de aço vendido em cinco anos. Disponível em: https://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/21783-nlmk-reduz-4-emissoes-co2-por-tonelada-aco-vendido-cinco-anos
- Melo, F. P., & Souza, R. M. (2015). Mapeamento geomorfológico da fragilidade ambiental do sítio urbano de Garanhuns - PE. *Nativa*, Sinop, v. 3, n. 4, p. 263-267. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/2191/pdf>
- Muñoz, P., Zwick, S., & Mirzabaev, A. (2020). The impact of urbanization on Austria's carbon footprint. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121326.
- Organização Das Nações Unidas –ONU. (2015). *Transformando nosso mundo: A agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável*. 2020.
- Júnior, A. P., Oliveira, B., & Pereira, E. (2015). Divergências entre o plano diretor participativo e a expansão urbana desordenada: o caso do município de Marabá. *Enciclopédia Biosfera*, 11(21).



- Prodanov, C. C., & Freitas, E. C. (2013). *Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico*-2ª Edição. Editora Feevale. Disponível em: <https://www.conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/2052>
- Rosa, N. P. V. (2018). Levantamento das emissões de gases de efeito estufa na construção de um condomínio residencial em série na cidade de Curitiba. 77f. (Monografia) Especialista no curso de Pós-Graduação no Setor de Ciências Agrárias. Universidade Federal do Paraná, Paraná.
- Russo, R. (2017). Construções em madeira e mudanças climáticas Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?56062/Artigo---Construcoes-em-Madeira-e-Mudancas-Climaticas>
- Schuster, B. S., Hipolito, V. M., Taboni, L. R. J, Knaut, B. F., & Correia, J.E. (2019). *Comparativo entre sistemas construtivos para a quantificação de emissão de CO₂*. 10f. Disponível em: <http://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2019/I-088.pdf>
- Stachera Junior, T. (2006). Avaliação de emissões de CO₂ na construção civil: um estudo de caso da habitação de interesse social no Paraná. Master's thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em: <https://riut.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/27142>
- Sethi, M. (2017). *Climate change and urban settlements: A spatial perspective of carbon footprint and beyond*. London and New York, Taylor & Francis Group.
- Tavares, E. C. De. S., & Gondim, P. C. A. (2008). Viabilidade técnica de conversão de cerâmicas do Rio Grande do Norte para gás natural. 5f. *Revista do Técnico Cerâmico Brasileiro*. Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC. Disponível em: <https://ceramicaindustrial.org.br/article/587657377f8c9d6e028b4746/pdf/ci-13-4-587657377f8c9d6e028b4746.pdf>
- Visedo, G., & Pecchio, M. (2019). Roadmap tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria brasileira até 2050. Rio de Janeiro: SNIC.
- Wang, J., Du, G., & Liu, M. (2022). Spatiotemporal characteristics and influencing factors of carbon emissions from civil buildings: Evidence from urban China. *PloS one*, 17(8), e0272295. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0272295>
- Worldsteel Association. (2020). Steel companies from around the world have been providing data for the wordsteel Sustainability Indicators since 2004. Disponível em: <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/sustainability/sustainability-indicators.html>