

Universidade de Brasília
Programa de Pós - Graduação em Arquitetura e Urbanismo
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo

Roberta Carolina Assunção Faria

**Metodologia de avaliação da emissão incorporada de GEE no estoque de edifícios
construídos**

BRASÍLIA – DF

2023

ROBERTA CAROLINA ASSUNÇÃO FARIA

**METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA EMISSÃO INCORPORADA DE GEE NO
ESTOQUE DE EDIFÍCIOS CONSTRUÍDOS**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de PósGraduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, como parte integrante dos requisitos necessários à obtenção do Grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, na Área de Concentração de Tecnologia, Ambiente e Sustentabilidade (TAS), Linha de Pesquisa: Sustentabilidade, Qualidade e Eficiência.

Orientador: Caio Frederico e Silva

Brasília, 05 de julho de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Cláudia Naves David Amorim

Prof. Lucas Rosse Caldas

Profa. Joára Cronenberg Ribeiro Silva

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C224m Carolina Assunção Faria, Roberta
Metodologia de avaliação da emissão incorporada de GEE no
estoque de edificios construídos / Roberta Carolina Assunção
Faria; orientador Caio Frederico e Silva. -- Brasília, 2023.
107 p.

Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) --
Universidade de Brasília, 2023.

1. Mudanças Climáticas. 2. Emissão Incorporada de GEE. 3.
Avaliação do Ciclo de Vida. 4. Edifícios Construídos. 5. Nuvem
de Pontos. I. Frederico e Silva, Caio , orient. II. Título.

*Dedico esta dissertação, primeiramente, aos meus pais, **Yara Rodrigues e Roberto Nunes**, que a partir de muito trabalho durante suas vidas conseguiram me proporcionarem acesso à educação de ponta, e independente dos percalços vividos, investiram seus recursos em meus estudos e acreditaram no meu potencial.*

Destaco, ainda, a coragem de minha mãe, que muito jovem, saiu sozinha de sua cidade em busca de melhores oportunidades de estudo e trabalho na em Brasília, ainda em construção. Saiba que sua força e história abriram muitas portas, não só para mim, como para várias pessoas.

Também destaco meu pai que, com seu nobre coração, sempre me incentivou, a partir do exemplo, a ser uma pessoa criativa, íntegra, justa e proativa. Tenho certeza de que suas habilidades de construção me influenciaram a escolher arquitetura e urbanismo como profissão.

*Dedico também ao meu orientador **Professor Dr. Caio Frederico Silva**, que desde a graduação sempre acreditou no meu potencial como aluna, arquiteta e pesquisadora, e que teve papel fundamental na construção, não somente, da pesquisa, mas na minha carreira e autoestima profissional. Agradeço a confiança, incentivo, amizade e excelente orientação.*

Agradecimentos

Agradeço aos colegas de orientação Msc. Thiago Goes, Msc. Adriano Lopes, Msc. Rejane Martins, Msc. Fernanda Messias pela troca grandiosa de ideias, boas experiências, que trouxeram melhorias a minha pesquisa e pela amizade.

Agradeço aos colegas Rafael Sobral, Luiz Gustavo, Gabriela Tavares, Ariane Sasso, da empresa Quali-A e Cynthia Berberian, da empresa Fundex Fundações, pelo apoio com o fornecimento de dados estruturais e arquitetônicos sobre os edifícios do Setor Noroeste.

Agradeço aos Professores Dra. Cláudia Amorim e Dr. Lucas Caldas por aceitarem compor a minha banca, apoiando na melhoria da qualidade da pesquisa.

Agradeço às minhas amigas Barbara Gomes, Carolina Mignon, Juliana Ozelim, Larissa Guerra, Camila Joko, Anne Santos pelas diversas conversas em momentos de ansiedade, de alta carga de trabalho e trocas de ideias e experiências sobre a vida e a pesquisa que contribuíram para manter minha saúde mental em dia e com a qualidade da pesquisa.

Agradeço aos meus colegas de trabalho Arthur Oliveira, pelo incentivo a iniciar o mestrado, Clementine Tribouillard tanto me incentivar a iniciar, como a continuar com o mestrado, em especial sempre enaltecendo meu interesse pelo tema de sustentabilidade e mudanças climáticas.

Agradeço ao Professor Dr. Dickran Berberian pelas conversas sobre meu tema da dissertação, sugestões sobre leituras de artigos e eventos no tema e por me incentivar a continuar na academia.

Agradeço a secretaria da Pós-graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, em especial ao Secretário do PPGFAU Francisco Junior., por responder prontamente todas as minhas dúvidas durante o curso de mestrado, pelo apoio com o envio de documentos e pela preocupação com a continuidade da minha bolsa,

Por fim, mas não menos importante, agradeço a CAPES pela concessão da bolsa de estudos no último ano do curso de mestrado.

Lista de Figuras

Figura 1 - Emissão de energia em diferentes atividades econômicas	2
Figura 2 - Ecossistema social urbano como vetor das mudanças ambientais	8
Figura 3 - Emissões de GEE do Município do Rio de Janeiro (2019)	16
Figura 4 - Processos iniciais de produção da construção	24
Figura 5 - Fluxo processual da ACV	32
Figura 6 – Estágios do ciclo de vida da edificação.	33
Figura 7 - Estrutura de avaliação de ciclo de vida	35
Figura 8 – Esquema das informações obtidas nos métodos de avaliação.....	37
Figura 9 - Fluxo do CeCarbon	42
Figura 10 - Fases de projeto BIM.....	44
Figura 11 - Fluxo do Scan-to-BIM	46
Figura 12 - Fluxo metodológico simplificado de pesquisa	47
Figura 13 - Localização do Setor Noroeste e entorno	49
Figura 14 - Etapa 01 do Setor Noroeste	50
Figura 15 - Projeto urbanístico da Etapa 01 do Setor Noroeste	51
Figura 16 - Composição da quadra do Projeto Urbanístico do Setor Noroeste	52
Figura 17 – Tipologias edilícias residenciais do Setor Noroeste	53
Figura 18 - Registros fotográficos da visita de campo	58
Figura 19 - Base para levantamento in loco das envoltórias	59
Figura 20 – Sensor terrestre no local do levantamento da tipologia 02	60
Figura 21 - Etapas de processamento e geração da nuvem de pontos	61

Lista de Quadros

Quadro 1- Terminologia de Edifícios Carbono Zero que consideram a emissão incorporada de GEE verificadas a partir de 2019	23
Quadro 2 - Resumo das etapas metodológicas da ACV	47
Quadro 3 - Definições da ACV para o estudo	56

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Definições dos escopos para inventários de cidades	12
Tabela 2 - Setor e subsetores passíveis de serem considerados nos inventários das cidades	12
Tabela 3 - Definições e fronteiras definidas para emissões incorporadas	25
Tabela 4 - Potencial de Aquecimento Global por composto.....	39
Tabela 5 - Informações gerais do escaneamento a laser das tipologias.....	60
Tabela 6 - Características físicas da Tipologia 01	62
Tabela 7 - Características físicas da Tipologia 02	63
Tabela 8 - Características físicas da Tipologia 03	65
Tabela 9 - Tipologia 01: Potencial de Aquecimento Global (PAG).....	67
Tabela 10 - Tipologia 02: Potencial de Aquecimento Global (PAG).....	68

Tabela 11 - Tipologia 03: Potencial de Aquecimento Global	69
Tabela 12 - Potencial de aquecimento global por área de fachada.....	73
Tabela 13 - Comparativo entre banco de inventários nacionais.....	75

Lista de Gráficos

Gráfico 1 – Tendência mundial dos estudos sobre emissões incorporadas por setor.....	27
Gráfico 2 – Influência dos impactos ambientais locais verificados na revisão de literatura	28
Gráfico 3 - Principais tipologias de edifícios e componentes verificados na revisão de literatura	29
Gráfico 4 – Definição das fronteiras de análise verificada na revisão de literatura	29
Gráfico 5 - Principais parâmetros de cálculos e base de dados verificados na revisão de literatura	30
Gráfico 6 - Sistematização do fluxo metodológico da ACV para edifícios construídos	55
Gráfico 7 - Tipologia 01: Emissão incorporada pelos materiais das fachadas	70
Gráfico 8 - Tipologia 02: Emissão incorporada pelos materiais das fachadas	71
Gráfico 9 - Tipologia 03: Emissão incorporada pelos materiais das fachadas	72
Gráfico 10 - Materiais de revestimento de maior impacto nas tipologias	74

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AbE	Adaptação baseada em Ecossistema
ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
AICV	Análise do Impacto do Ciclo de Vida
AFOLU	<i>Agriculture, Forests and Other Land Use</i>
BIM	<i>Building Information Modelling</i>
CDR	Combustível derivado de resíduos
CLNW	Comércio Local Noroeste
COP	<i>Conference of the Parties</i>
CRNW	Comércios Residenciais Noreste
DAP	Declaração Ambiental de Produtos
EBC	<i>Energy in Buildings and Communities Programme</i>
EPIA	Estrada Parque Indústria e Abastecimento
GDF	Governo do Distrito Federal
GEE	Gases de Efeito Estufa
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas
ICV	Análise de Inventário de Ciclo de Vida
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IPPU	<i>Industrial Processes and Product Use</i>
IPTU	Imposto sobre Propriedade Predial e Territorial Urbana
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>
LULUCF	<i>Land Use, Land Use Change and Forestry</i>
NBR	Norma Brasileira
NDC	<i>Nationally Determined Contributions</i>
PNMC	Plano Nacional sobre Mudança do Clima
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
SEEG	Sistema de Estimativa de Emissões de GEE
SETAC	<i>Society for Environmental Toxicology and Chemistry</i>
SIDAC	Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção
SINIR	Sistema Nacional de Informações e Gestão de Resíduos Sólidos
SHCNW	Setor de Habitações Coletivas do Noroeste
SQNW	Super Quadra Noroeste
WGBC	<i>World Green Building Council</i>
UNFCCC	<i>United Nation Framework Convention on Climate Change</i>
ZCB	<i>Zero Carbon Building</i>

Sumário

Introdução.....	1
Justificativa.....	4
Objetivos.....	6
Estrutura do trabalho.....	7
1 Referencial Teórico.....	8
1.1 As mudanças climáticas no contexto urbano brasileiro.....	8
1.1.1 Estratégias nacionais.....	9
1.1.2 Estratégias locais.....	11
1.1.3 Análises dos planos sob a construção de edifícios.....	20
1.1 O conceito <i>Zero Carbon Building</i> (ZCB).....	22
1.2 Edifícios de baixa emissão incorporada de GEE.....	24
1.2.1 Normas para edifícios de baixa emissão incorporada de GEE.....	31
1.2.2 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de edificações.....	34
1.3 Ferramentas de avaliação de emissões incorporadas em edifícios no contexto brasileiro ..	39
1.3.1 Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (SIDAC).....	40
1.3.2 Declaração Ambiental de Produto (DAPs).....	41
1.3.3 CECarbon.....	42
1.3.4 Ecoinvent.....	43
1.4 BIM e edifícios construídos.....	43
1.4.1 Escaneamento a laser.....	44
2 Material e Métodos.....	47
2.1 Objeto da pesquisa: Setor de Habitações Coletivas Noroeste (SHCNW).....	48
2.1.1 Tipologias edilícias residenciais do estudo.....	52
3 Resultados e Discussão.....	54
3.1 Definição do objetivo e escopo.....	56
3.2 Análise do inventário do ciclo de vida (ICV).....	56
3.2.1 Análise da Subestrutura.....	57
3.2.2 Análise da Superestrutura.....	57
3.3 Avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV).....	67
3.4 Interpretação.....	70
3.4.1 Materiais das fachadas.....	70
3.4.2 Materiais de revestimento das fachadas.....	73
3.4.3 Comparativos entre diferentes bancos de inventários.....	75
3.4.4 Análise de Benchmarking.....	76
4 Conclusões e Recomendações finais.....	77
Referências.....	79
Apêndices.....	89

Resumo

Introdução: A construção de edifícios é parcela relevante na emissão de gases de efeito estufa (GEE), mas carece de informações quanto às emissões de GEE embutida nos processos e seus elementos construtivos. **Objetivo:** Elaborar um fluxo metodológico para a avaliação do potencial de aquecimento global (PAG) no estoque de edifícios construídos no contexto brasileiro. **Objetivos específicos:** (i) Levantar as principais ferramentas de apoio à ACV para o contexto brasileiro; (ii) Verificar a maturidade de bancos de dados nacionais; e (iii) Utilizar tecnologia de nuvem de pontos no levantamento das tipologias. **Método:** A pesquisa está organizada em seis etapas. Inicialmente, (i) determina-se a área de estudo como a etapa 01 do Setor Noroeste, no Distrito Federal, para em seguida (ii) determinar quais são as tipologias edilícias para a análise, que neste estudo são três tipologias com diferentes áreas de projeções de plantas; posteriormente, é proposto o (iii) levantamento das características das tipologias; (iv) a extração e organização dos dados obtidos no levantamento; para (v) a realização da ACV das tipologias analisadas; e, por fim, (vi) a interpretação dos resultados obtidos na ACV para comunicá-los. **Resultados:** Observou-se o desconhecimento e carência de informações sobre potencial de aquecimento global advindo dos edifícios construídos no contexto brasileiro a partir da avaliação de alguns planos de mitigação climática de cidades. Outro ponto observado foi a existência de diferentes instrumentos de apoio à avaliação das emissões de GEE no setor da construção de edifícios no contexto brasileiro, porém ainda não há uma plataforma única consolidada para uso. Também se destacou a usabilidade da tecnologia de escaneamento a laser e nuvem de pontos para o levantamento de informações de edifícios construídos. A tipologia 1 (23 unidades) obteve como resultado da ACV o total de 2,85 kgCO₂eq./m².a, a tipologia 2 (51 unidades) obteve 5,30 kgCO₂eq./m².a e a tipologia 3 (11 unidades) obteve 5,85 kgCO₂eq./m².a, totalizando 400,2 kgCO₂ eq./m².a advindos dos edifícios residenciais da etapa 01 do Setor Noroeste-DF, considerando a vida útil de 50 anos. Comparando os resultados obtidos no estudo com a literatura, que apresenta o valor de 10 kgCO₂eq/m².a para o edifício residencial nas etapas A1-A3 para o contexto brasileiro, observa-se que os valores obtidos estão dentro do verificado. Outro resultado verificado foi a contribuição dos materiais de revestimento, como granito (tipologias 1 - 71%) e reboco (tipologia 2 – 33% e tipologia 3 – 50%) no potencial de aquecimento global verificado nas fachadas. Por fim, pondera-se que arquiteturas que consideram o uso racional de materiais contribuem com a construção de edifícios de menor emissão incorporada de GEE.

Palavras-chave: Mudanças climáticas, emissão incorporada de GEE, avaliação do ciclo de vida, edifícios construídos, nuvem de pontos

Introdução

Em 2019, o IPCC estimou que as atividades antrópicas ocasionaram o aumento de 1,0°C acima dos níveis pré-industriais, e se projeta alcançar os níveis de 1,5°C entre 2030 e 2052, e em seu 6º relatório de avaliação comenta que caso as emissões de gases de efeito estufa (GEE) globais continuem sendo produzidas no ritmo atual, o aquecimento terrestre em 1,5°C ocorrerá antes de 2030 (IPCC, 2022). Diante disto, alerta-se que caso o nível de emissão de GEE se mantenha em alta haverá restrições em diversas atividades humanas.

O aumento das emissões de GEE, consideradas o principal causador das mudanças climáticas (BRAGA, 2012), são, em sua maioria, originadas por atividades urbanas como o transporte, construção, indústria e consumo de energia (BAI et al., 2018; BIROL, 2010; CRIPPA et al., 2021). Para mais, as áreas urbanas estão em crescimento como apontado por Espíndola e Ribeiro (2020) que em 2019, 55% da população vivia em território urbano e as projeções atuais indicam o aumento de para 68% em 2050.

A urbanização desenfreada afeta os processos ecológicos alterando as características biofísicas do meio ambiente o que resulta em diversos e interrelacionados efeitos tanto locais, como globais (ALBERTI; HUTYRA, 2009). Dentre as atividades de urbanização, destaca-se neste trabalho o setor da construção civil, especificamente a atividade de construção e operação de edifícios, que em 2019 foi responsável por 38% das emissões de CO₂ (UNEP, 2020), destaca-se que, de acordo com o IPCC (2022), 95% das emissões de GEE são de CO₂.

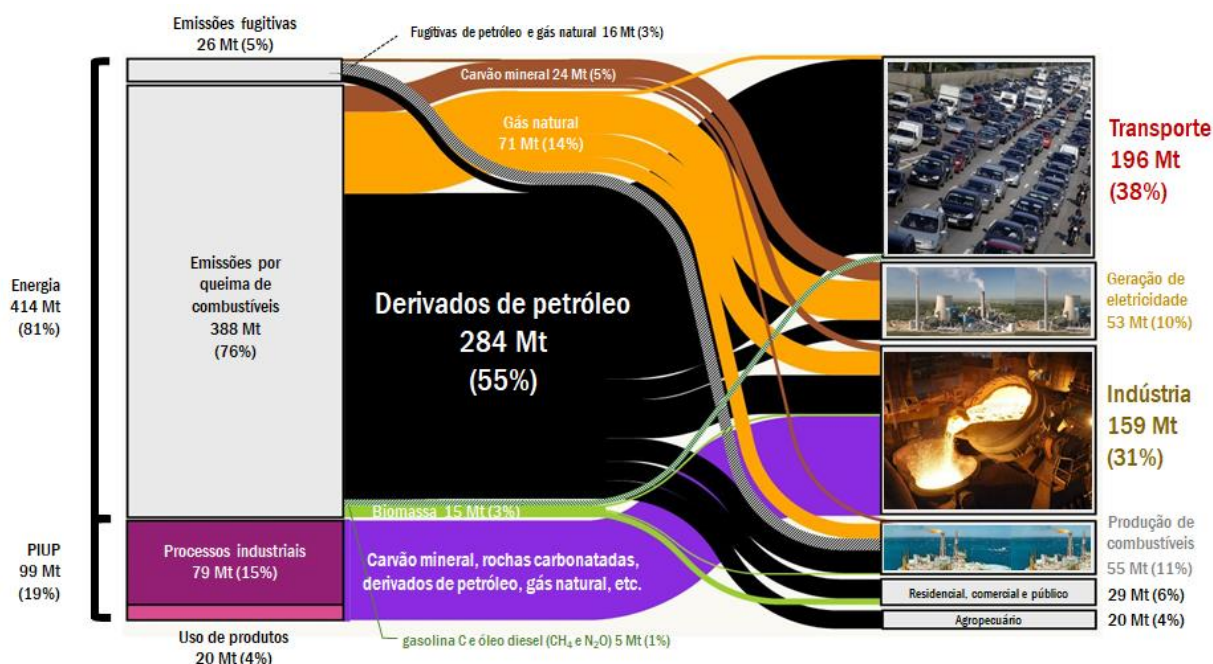
Além disso, as edificações construídas utilizam, durante todo o seu ciclo de vida, entre 14% e 50% de matéria prima extraída da natureza (GRIGOLETTI, 2001; RUUSKA; HÄKKINEN, 2015), 40% são referentes ao consumo de energia pela edificação, 25% pelo consumo de água e 12% do uso do solo, além de produzir 25% de resíduos sólidos (UNEP, 2009).

Dando enfoque ao contexto brasileiro, em 2020, o país foi o 5º maior emissor de GEE no mundo, sendo 25,8% das emissões líquidas advindas do setor de energia¹, no entanto a atividade da construção também impacta transversalmente outras atividades econômicas de

¹ Contemplando as atividades de transporte (47,1%), produção de combustíveis (14,4%), industrial (14%), geração de eletricidade (11,7%), consumo de energia residencial (7,5%), agropecuário (5,2%) e comercial e público (0,5%) (SEEG, 2020).

alta contribuição para as emissões, como: o transporte, indústria e resíduos (Figura 1), em etapas a montante e a jusante à construção (canteiro de obra) e operação do edifício. Apesar do Brasil ter grande parte de sua matriz energética renovável (47,4%), boa parte da matriz é composta por energia hídrica com 12,5% (EPE, 2023), e ressalta-se que essa fonte está vulnerável aos impactos das mudanças climáticas, que atenuam os episódios de escassez e inundações no país, (CHAGAS; CHAFFE; BLÖSCHL, 2022), afetando diretamente a produção de energia do país.

Figura 1 - Emissão de energia em diferentes atividades econômicas



Fonte: SEEG, 2019

De acordo com a literatura, grande parte das emissões atreladas a edificações estão setorizadas em sua operação, no entanto, logo em seguida, as emissões embutidas - vinculadas aos processos de produção, construção do edifício, transporte, gerenciamento e administração do canteiro de obra (DIXIT, 2017), demolição e descarte dos resíduos da construção são as mais relevantes (DE WOLF et al., 2017; DIXIT et al., 2012; HÄKKINEN et al., 2015; IBN-MOHAMMED et al., 2013; IEA, 2016). E como observado, o impacto das emissões de GEE resultante dos edifícios é transversal a outros importantes setores como a indústria, transporte, extração de recursos, resíduos sólidos e energético e que varia bastante entre países (LÜTZKENDORF; BALOUKTSI, 2016), tornando-se um setor

essencial para se alcançar o compromisso mundial de reduzir as emissões de GEE (UNEP, 2020).

Com relação a perspectiva das emissões incorporadas, o Brasil se destaca tendo em vista que a demanda por material de construção por habitante é de 4 a 7 toneladas por ano, ou seja, a atividade de produção dos materiais de construção possui grande protagonismo nas emissões de GEE no país (AGOYPAN; JOHN, 2011). Ademais, de acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos (SINIR, 2015), cerca de 84 milhões de metros cúbicos de resíduos sólidos são advindos da construção civil no Brasil, sendo 63% resíduos de argamassa de concreto utilizada no assentamento de estruturas.

Há muito o que se considerar sobre as emissões embutidas nos materiais e processos construtivos (HERNANDEZ; KENNY, 2010), principalmente com relação as emissões advindas da etapa de produção do edifício estarem aumentando mundialmente (POMPONI; MONCASTER, 2016; RÖCK et al., 2020). E em muitos países às emissões incorporadas de GEE na construção de edifícios ainda não estão sendo regulamentados (BIRGISDÓTTIR et al., 2016), como é o caso do Brasil.

Sob a perspectiva econômica, de acordo com a Genin e Romeiro (2020), ações de baixa emissão de GEE gerariam cerca de 2 milhões de empregos a mais no país do que o avaliado para o modelo econômico atual. Além disso, o setor da construção civil, especificamente o de edificações, é de grande relevância econômica no Brasil. Segundo a Câmara Brasileira de Indústria da Construção (CBIC, 2022), em 2021, a indústria da construção civil impactou no crescimento de 9,7% do PIB, e de acordo com o IBGE (2023), em 2021, 44,6% do valor de incorporações, obras e/ou serviços do setor da construção foram parte da atividade da construção de edifícios, também sendo a atividade que mais emprega do setor, com 36,7%. Por fim, dentre os sete grupos de produtos e serviços observados do setor da construção civil, durante 10 anos, as obras residenciais foram o principal produto do setor, que, em 2021, atingiu 23% (IBGE, 2022).

Outro ponto relevante é o impacto positivo do avanço da indústria 4.0 na construção de edifícios como estratégia de tornar o setor mais sustentável por meio de processos mais eficientes. A indústria 4.0 unifica processos físicos e digitais os associando aos processos construtivos (LU, 2017; SCHAWAB, 2017). De acordo com a Confederação Nacional de Indústria, a indústria 4.0 se baseia em 11 pilares, e nesta pesquisa dois deles se destacam,

sendo ele: a manufatura digital e sistemas de simulação. Ambos pilares consistem em criar modelos digitais permitindo sua visualização em 3D e simulando os dados captados da realidade em ferramentas que possibilitem diferentes usos e análises.

Nessa conjunção, fomentar a construção de edifícios que tenham um menor potencial de aquecimento global, ou menor impacto com relação às mudanças climáticas, por meio da redução das emissões de GEE deve ser uma meta urgente para todos os agentes que atuam na atividade de construção de edifícios (LÜTZKENDORF; BALOUKTSI, 2016). Portanto, é de grande relevância que haja estratégias alinhadas com a diminuição das barreiras que inviabilizam as ações (IBN-MOHAMMED et al., 2013) pelo setor da construção civil, e que essas ações sejam apoiadas por metodologias, estudos, dados (JOHN et al., 2020) e tecnologias inovadoras adaptadas ao contexto brasileiro.

Justificativa

No contexto mundial, diferentes países discutem ações de mitigação das mudanças climáticas com a limitação das emissões de GEE, pois construir estratégias para a mitigação das mudanças climáticas para as cidades não é uma tarefa simples (LANDAUER; JUHOLA; KLEIN, 2019), e muito do desafio parte da falta de dados coletados, novas maneiras de compreender a mitigação das mudanças climáticas e pela necessidade de realizar mais estudos comparativos, simulações e construção de cenários baseados nas mudanças climáticas (ESPÍNDOLA; RIBEIRO, 2020). E quando se trata especificamente do setor da construção civil, com a atividade de construção de edifícios, esse desafio aumenta devido a dificuldade de coletar dados comparáveis (LÜTZKENDORF; BALOUKTSI, 2016), que aumenta ainda mais para edifícios já construídos.

De acordo com o IBGE, a construção de edifícios domiciliares verticais cresceu 321% entre 1984 até 2019, o que demonstra um aumento de edifícios nas áreas urbanas. A edificação construída, no contexto das emissões de GEE, gerou e ainda gera impactos, sendo este um elemento chave e base para compreender o potencial de aquecimento global existente nos parques edificados para melhor avaliar e diminuir os impactos futuros advindo desse setor. Portanto a reutilização, reuso e reformas de edifícios construídos é considerada uma medida de sustentabilidade ambiental, pois diminui a necessidade de novos materiais e reduz resíduos da construção e toda energia incorporada em novos processos para produção de novos edifícios (ARMSTRONG; WILKINSON; CILLIERS, 2023). No entanto, o grande

desafio para a contabilização do impacto desses edifícios é a carência de informações e dados sobre em diferentes etapas de vida dos edifícios.

Descrevendo o papel de alguns importantes agentes da cadeia da construção de edifícios na redução das emissões de GEE, destaca-se os formuladores de políticas, projetistas e fabricantes de produtos para a construção. Formuladores de políticas são responsáveis por elaborar instrumentos, programas, planos e políticas norteadoras e incentivos para que outros agentes da construção de edifícios busquem desenvolver edifícios de menor emissão de GEE (MISTRETTA et al., 2016).

As empresas fabricantes de produtos para construção são agentes de grande relevância na redução da emissão de GEE, principalmente incorporada, vinculada a fase de manufatura dos produtos e na comunicação das informações técnicas dos produtos – incluindo os impactos ambientais do mesmo, para aumentar a transparência e competitividade do mercado vinculando critérios de qualidade ambiental aos produtos (BALOUKTSI; LÜTZKENDORF; KREINER, 2016). Por fim, projetistas são agentes essenciais para contribuir com a redução da emissão, pois influenciam diretamente nas decisões dos projetos dos edifícios, como a escolha de materiais de qualidade e de menor impacto (LÜTZKENDORF; BALOUKTSI, 2016). Sendo assim, para que a pauta de descarbonização esteja presente na atividade de construção de edifícios é decisivo o engajamento de todos os agentes envolvidos na cadeia no compartilhamento de informações, incluindo a mensuração dos impactos ambientais, sobre os processos produtivos de todas as etapas de vida um edifício (JOHN et al., 2020).

O 6º relatório do IPCC aponta desafios presentes para descarbonizar os edifícios, que estão atrelados a todos os agentes da cadeia de produção e consumo. Destaca-se como barreira, tanto para edifícios construídos como a serem construídos, a falta de materiais de alto desempenho, técnicas de construção de baixo carbono, capacidade de monitoramento, carência de informação entre outras. Para além de tentar responder diretamente aos desafios apresentados, o relatório também aborda a utilização de tecnologias mais eficientes, como o *Building Information Modeling* (BIM) sendo uma maneira de apoiar nas ações de descarbonização de edifícios (IPCC, 2022).

Portanto, esta pesquisa busca apoiar na superação de alguns desafios elencados pelo IPCC mencionados anteriormente para a descarbonização de edifícios, com apoio do BIM,

focando especificamente para o estoque de edifícios já construídos, tendo em vista o seu alto potencial de redução das emissões e, para fins de apoiar no planejamento de cidades de menos emissão, a necessidade de entender o impacto já ocasionado por edifícios já construídos como a base para traçar estratégias de descarbonização mais alinhadas com a realidade local.

Objetivos

Objetivo Geral

Elaborar um fluxo metodológico para a avaliação do potencial de aquecimento global (PAG) no estoque de edifícios construídos no contexto brasileiro.

Objetivos Específicos

- i. Levantar as ferramentas de apoio a ACV para o contexto brasileiro;
- ii. Verificar a maturidade de diferentes bancos de dados nacionais;
- iii. Utilizar tecnologia de nuvem de pontos no levantamento de edifícios construídos

Estrutura do trabalho

O trabalho se estrutura em cinco partes, sendo a primeira de introdução onde se encontram a justificativa e objetivos do trabalho, já as demais partes são quatro capítulos, sendo o primeiro de referencial teórico, o segundo sobre o material e métodos da pesquisa, o terceiro contendo os resultados obtidos e o quarto com as conclusões e recomendações finais.

A primeira parte, de introdução, faz uma contextualização sobre o aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e como o aumento da produção e consumo advindo do atual modelo econômico mundial e o crescimento exponencial das cidades são grandes responsáveis por esse cenário. Além disso, é destacado o papel do setor da construção dentro do contexto das mudanças climáticas, sugerindo que haja um maior engajamento deste setor e de seus diferentes agentes para apoiar na meta global de mitigação das alterações climáticas.

O capítulo 1 apresenta o referencial teórico do trabalho, subdividindo-se em discussões sobre as mudanças climáticas no contexto brasileiro, a qual discute as estratégias nacionais e locais existentes no país, apresenta o conceito de edifícios carbono zero (em inglês *zero carbon Building – ZCB*), faz uma análise sobre edifícios de baixa emissão incorporada de GEE, incluindo a apresentação de normas, análise das ferramentas de apoio ao tema existentes no Brasil e, por fim, apresenta o uso do BIM destacando o escaneamento a laser e criação de nuvem de pontos.

O capítulo 2 apresenta o material e método da pesquisa, destacando-se o uso da metodologia ACV como base para o estudo. Outro elemento de destaque no capítulo é a apresentação do objeto da pesquisa que é o Setor de Habitações Coletivas Noroeste (SHCNW), localizado em Brasília-DF, dando enfoque na etapa 01 do Setor.

O capítulo 3 apresenta os resultados da pesquisa que sistematiza um fluxo metodológico focado na avaliação de edifícios já construídos seguindo a estrutura da ACV: definição do objetivo e escopo, análise do inventário do ciclo de vida (ICV), análise do impacto do ciclo de vida (AICV) e interpretação dos resultados obtidos.

Por fim, o capítulo 4 apresenta as conclusões e recomendações para trabalhos futuros, que, neste caso, buscou fazer uma análise crítica dos achados da pesquisa.

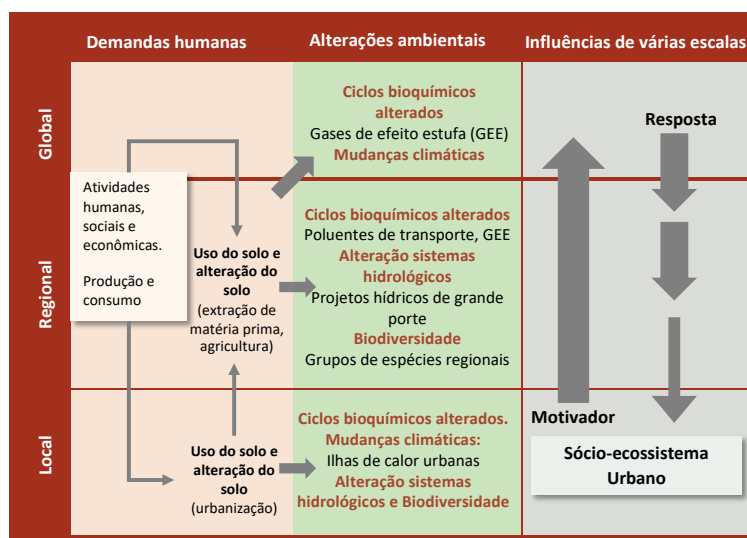
1 Referencial Teórico

Este primeiro capítulo apresenta quatro temas principais, sendo eles: as mudanças climáticas observadas no contexto urbano brasileiro, composto pelo entendimento das estratégias regionais e locais com a análise dos planos de mitigação climática dando enfoque na atividade da construção de edifícios; o conceito Zero Carbono Building (ZCB), edifícios de baixa emissão incorporada de GEE, neste caso abordando as normas, metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e as ferramentas e instrumentos de avaliação da emissão incorporada de edifícios no contexto brasileiro, apresentando o SIDAC, as DAPs, plataforma CeCarbon, o software Simparo e banco de inventários Ecoinvent; e por fim, é tratado o tema do uso de BIM em estudo de edifícios construídos, destacando-se o escaneamento a laser e nuvem de pontos.

1.1 As mudanças climáticas no contexto urbano brasileiro

As estratégias para mitigação das mudanças climáticas estão sendo incluídas em ações de governança por meio de leis, decretos, planos e políticas públicas para alcançar as metas de descarbonização dos países estipuladas em acordos internacionais. A Figura 2 abaixo demonstra como questões como a extração da matéria prima, a urbanização, ou seja, atividades que dependem da relação entre a sociedade e demandas de produção e consumo, são um importante fator a ser considerado na escala regional e local para o tema de mitigação das mudanças climáticas.

Figura 2 - Ecossistema social urbano como vetor das mudanças ambientais



Fonte: Traduzido de GRIMM et al. (2008)

Para compreender a atuação do Brasil no enfrentamento das alterações climáticas, seja a nível de país ou cidade, sob a perspectiva dos edifícios, alguns instrumentos são colocados em discussão abaixo tanto para o contexto nacional como local.

1.1.1 Estratégias nacionais

Em 2009, o Plano Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) foi promulgado pela lei nº12.187, 2009, de modo a fomentar ações de mitigação no Brasil que se estrutura em quatro eixos: i. oportunidades de mitigação; ii. impactos, vulnerabilidades e adaptação; iii. pesquisa e desenvolvimento e v. educação, capacitação e comunicação. A oportunidade de mitigação visionada para o setor de edificações pelo Plano foca sua estratégia no consumo energético do edifício, que verifica a:

“Utilização de equipamentos eficientes e de energia solar, além da adoção de um sistema de planejamento integrado que permita ganhos de eficiência no uso da energia.” (BRASIL, 2008, p. 27)

Em 2015, o Acordo de Paris² é adotado pelos países signatários das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima (UNFCCC) na Conferência das Partes - COP³ (COP21). O Brasil, por meio da Contribuição Nacionalmente Determinada (*Nationally Determined Contributions* - NDC, em inglês), se comprometeu em reduzir suas emissões de GEE em 37% até 2025, aumentando a meta para 43% até 2030 em relação aos níveis emitidos estimados em 2005, para atingir a neutralidade climática em 2060. Logo, os planos brasileiros consistem, em suma, reduzir a emissão de GEE no consumo de combustíveis, na gestão de florestas, no uso de energias renováveis em 45% até 2030 entre outros. No entanto, em 2020, a NDC brasileira foi atualizada com metas menos ambiciosas, pois manteve o objetivo para 2030 em reduzir 43% das emissões, o que deveria ser atualizado para 57%, e a NDC também não apresentou metas setoriais, como apresentava em sua primeira versão (FELIN et al., 2021). Nesta COP, também se discutiu a necessidade de medir diretamente as contribuições da construção de edifícios na emissão de GEE (LÜTZKENDORF; BALOUKTSI, 2016).

² O objetivo deste acordo é que os governos se comprometam com ações para frear o aumento da temperatura média global abaixo dos 2°C em relação aos níveis pré-industriais.

³ De acordo com as Nações Unidas, o objetivo dessa conferência é reunir anualmente os 196 países signatários da Convenção-Quadro das Nações Unidas que debatem o tema de mudanças climáticas a fim de dialogar sobre a limitação das emissões perigosas de GEE. (Informação disponível em: <https://unfccc.int/process/bodies/supreme-bodies/conference-of-the-parties-cop>).

Já na COP 26, realizada em 2021 na cidade de Glasgow, a primeira COP desde o instaurado da pandemia do COVID-19, foram tratados os temas de: mercado internacional de carbono⁴, partilha das responsabilidades entre agentes - como os diferentes níveis de governo, empresas, academia, sociedade civil e outros (NAÇÕES UNIDAS, 2021). Essa pauta busca reforçar a importância do papel de cada agente para colocar na prática os planos de ação de mitigação às mudanças climáticas (NAGEL et al., 2019). Além disso, nessa COP marcou-se 5 anos da assinatura do Acordo de Paris. Na COP 27, que ocorreu em 2022 no Egito, foram discutidos o planejamento da implementação do Acordo de Paris, buscando fortalecer o compromisso da diminuição das emissões de GEE na atmosfera. Para isso, a pauta de financiamento climático foi um dos temas tratados a fim de concretizar ações de mitigação e adaptação às mudanças climáticas. Com relação às conferências futuras, destaca-se que na COP 28, realizada no final de 2023 em Dubai, será feito o primeiro balanço global das ações até então discutidas frente a mitigação e adaptação das mudanças climáticas, e a COP 30, no final de 2025, será realizada no Brasil.

Já no Brasil, segundo o SEEG (2021), o sistema de estimativa de emissões e remoção de GEE não apresenta dados consolidados sobre o setor da construção civil nas atividades econômicas, em especial a atividade de construção de edifícios – apesar de sua forte influência econômica no país, mas apresenta atividades que influenciam no setor, como processos industriais, energia, mudança de uso da terra e florestas e resíduos.

Por fim, fato recente a esta pesquisa, o Governo Federal brasileiro publicou cinco decretos relacionados ao tema de mudanças climáticas, buscando fortalecer a política climática do país para melhor se preparar para as negociações da COP28 e COP30. O Decreto 11.550 estabelece a criação de um comitê interministerial sobre mudança do clima para monitorar e supervisionar as ações e políticas públicas referentes à PNMC no âmbito do Poder Executivo Federal (BRASIL, 2023a). O Decreto 11.549 é uma alteração do decreto 9.578/2018 sobre o Fundo Nacional de Mudança do Clima para permitir que agentes privados possam atuar em operações de financiamento do Fundo por meio do BNDES, e também inclui a representação de povos indígenas e comunidades tradicionais no comitê gestor do Fundo (BRASIL, 2023b). O Decreto 11.548 revoga o decreto 10.144/2019 para instaurar a

⁴ Mecanismo de venda de créditos de carbono entre países que limitaram suas emissões acima da meta, para países que emitiram além do definido.

Comissão Nacional para Redução das Emissões de GEE Provindas do Desmatamento e da Degradação Florestal, Conservação dos Estoques de Carbono Florestal, Manejo Sustentável de Florestas e Aumento de Estoques de Carbono Floresta que também inclui povos indígenas e comunidades tradicionais, além de organizações não governamentais, instituição de ensino superior ou pesquisa do setor privado (BRASIL, 2023c). O decreto 11.547 revoga o decreto 10.275/2020 para instituir o antigo Comitê técnico da indústria de baixo carbono em Secretaria – Executiva do Comitê a Secretaria de Economia Verde, Descarbonização e Biondústria do Ministério de Desenvolvimento, indústria e Comércio e Serviços (BRASIL, 2023d). Por fim, o decreto 11.546 constitui o Conselho Nacional para a 30ª COP que será realizada no Brasil (BRASIL, 2023e).

1.1.2 Estratégias locais

Especificamente em relação aos edifícios, em 2018, diversas cidades ao redor do mundo estabeleceram planos regulamentados exigindo que novos edifícios fossem neutros em carbono até 2030, e que edifícios existentes atingissem a neutralidade até 2050, de maneira a apoiar o objetivo do Acordo de Paris (C40, 2018). Para isso, organizações como a C40 cities⁵, Governos locais pela sustentabilidade (ICLEI)⁶, CDP Disclosure insight action⁷ e World Green Building Council (WorldGBC)⁸ desde então apoiam as municipalidades a atingirem seus objetivos em relação as metas de descarbonização.

Instrumentos utilizados para cumprir as metas de descarbonização pelas cidades, normalmente, são inventários de GEE e planos de ação climática, com um periódico monitoramento, (FONG et al, 2018) para compreender as emissões e remoções locais com relação a suas fontes e sumidouros (HUET, 2014).

A metodologia comumente utilizada para elaboração dos inventários é denominada *Global Protocol for Community Scale Greenhouse Gas Emissions Inventories* (GPC), ou Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol), desenvolvida pela C40, WRI e ICLEI baseado no guia nacional de inventários publicado pelo IPCC em 2006. Dentro dessa metodologia, existem duas possíveis abordagens para o inventário, sendo elas: *top down* e *bottom up*. A análise *top down* consiste em avaliar dados de entrada e saída da produção nacional e de

⁵ Disponível em: <https://www.c40.org/about-c40/>

⁶ Disponível em: <https://americadosul.iclei.org/quem-somos/>

⁷ Disponível em: <https://www.cdp.net/en/info/about-us>

⁸ Disponível em: <https://worldgbc.org/>

combustíveis primários do país, não sendo uma análise muito aprofundada sobre como são consumidos os combustíveis. Já na análise *bottom up* é feita uma avaliação das emissões por atividade nas cidades, obtendo uma maior acurácia (LOBO, SANTOS, TAVARES, 2010) e entendimento sobre os impactos de cada atividade. A análise *bottom up* é categorizada em três diferentes escopos que são definidos a partir de onde ocorrem as emissões fisicamente nas cidades, como apresentado na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 - Definições dos escopos para inventários de cidades

Escopo	Definição inventários de cidades	Definição inventários da construção civil
Escopo 1	Emissão de GEE por fontes localizadas dentro das fronteiras da cidade.	Emissões diretas controladas pela empresa ou que são emissões de fontes da propriedade.
Escopo 2	Emissão de GEE que ocorrem em consequência do uso de energia elétrica, calor, resfriamento fornecidos pela rede elétrica dentro das fronteiras da cidade	Emissões indiretas de GEE advindas da contratação da energia consumida pela empresa construtora em suas atividades.
Escopo 3	Todas as demais emissões de GEE que ocorrem fora das fronteiras da cidade resultantes das atividades decorrentes dentro das fronteiras da cidade.	Outros tipos de emissões indiretas de GEE que ocorrem em função das atividades da empresa, porém estão fora do controle ou propriedade da mesma.

Fonte: Adaptado de FONG et al (2018) e PETRONILO et al. (2015).

Além disso, seis principais setores costumam ser analisados durante a elaboração dos inventários, como i. energia estacionária, ii. transporte, iii. resíduos, iv. processos industriais e consumo de produtos (em inglês, *Industrial Processes and Product Use - IPPU*), v. uso da terra, mudanças do uso da terra e florestas (em inglês, *Land Use, Land Use Change and Forestry - LULUCF*) e vi. qualquer outra emissão que ocorra fora dos limites geográficos como resultado das atividades internas da cidade (FONG et al, 2018).

Tabela 2 - Setor e subsetores passíveis de serem considerados nos inventários das cidades

Setor	Subsetor
Energia Estacionária	<ul style="list-style-type: none"> • Construções residenciais • Construções comerciais e institucionais • Indústria de manufatura e construção • Indústria de energia • Agricultura, silvicultura e pesca • Fontes não especificadas
Transporte	<ul style="list-style-type: none"> • Transporte rodoviário • Transporte ferroviário • Transporte aquaviário • Transporte aéreo
Resíduos	<ul style="list-style-type: none"> • Disposição de resíduos em aterro sanitário • Tratamento biológico • Incineração e queima de resíduos • Disposição de efluentes

Processos industriais e consumo de produtos (IPPU)	<ul style="list-style-type: none"> • Processos industriais (produção de vidro, uso de lubrificantes e parafinas, produção de ferro e aço) • Consumo de produtos
Uso da terra, mudança do uso da terra e florestas (LULUCF)	<ul style="list-style-type: none"> • Pecuária • Uso do solo • Fontes agregadas • Arborização urbana
Outras emissões de Escopo 3	<ul style="list-style-type: none"> • Atividades que ocorrem fora das fronteiras da cidade, mas que são demandadas pela cidade

Fonte: Adaptado de FONG et al. (2018)

No Brasil, algumas cidades estão elaborando seus inventários e realizando as atualizações necessárias dos dados para apoiar nos planos de ação climática local. O inventário de cada cidade apresenta características específicas do contexto local que reflete nos setores e subsetores considerados no levantamento de dados. Abaixo são apresentados inventários e planos climáticos de cinco cidades distribuídas nas cinco regiões do Brasil, como: Rio Branco/AC, Salvador/BA, Rio de Janeiro/RJ, Porto Alegre/RS e Brasília/DF com o intuito de compreender a abordagem dos inventários e planos, e principalmente verificar como os edifícios são representados nos documentos e dentro de quais ações estratégicas de mitigação das mudanças climáticas.

a. Rio Branco– Acre

No município de Rio Branco o inventário realizado entre os anos 2012 e 2016 informa que a maior parte das emissões são rurais, correspondendo a 77,2% e 22,8% no meio urbano. Sob esse cenário, os setores de maior contribuição para as emissões de GEE na área urbana foram o de transportes (79%) e energético (18%), este último tendo como destaque as fontes residenciais (46%), comerciais / institucionais (45%), que representaram 91% das emissões, e fontes industriais representam (4%) (MARTINS; MELO; ARAÚJO, 2019). No inventário realizado não foram mencionados em maior detalhe subsectores relacionados com os edifícios⁹ – industriais, canteiro de obras, operação e descarte de resíduos.

O Plano Municipal de Mitigação e Adaptação às Mudanças do Clima elaborado em 2020, com base no inventário do município, apresenta seis eixos estratégicos para superar os

⁹ Lembrando que as atividades da construção de edifícios também influenciam nos outros setores verificados no inventário de maneira indireta, como transporte, resíduos e IPPU.

desafios verificados, como eixo setorial de uso do solo urbano, uso do solo rural, mobilidade urbana, saneamento, energias alternativas / renováveis e comunicação e monitoramento do PMAMC de Rio Branco. Segundo o Plano, e dando enfoque as atividades que mais se relacionam com o tema de edifícios, destaca-se os seguintes eixos estratégicos setoriais com as respectivas ações estratégicas:

- Uso do solo urbano
 - “Adoção de normas para que as novas construções e infraestrutura urbana do Município incorporem os conceitos de sustentabilidade e adaptação às mudanças climáticas, obedecendo critérios de eficiência energética, sustentabilidade ambiental, qualidade e eficiência de materiais, conforme definição em regulamentos específicos”;
 - “Introdução dos conceitos de eficiência energética e ampliação de áreas verdes nas edificações licenciadas pelo Município”;
 - “Criação de incentivo fiscal para proprietários de imóvel arborizados e compensação para proprietários de imóveis que arborizam calçadas”.
- Energias Alternativas / Renováveis
 - “Incentivo à adoção de energias sustentáveis através de programa municipal de energias renováveis”

b. Salvador – Bahia

O Município de Salvador elaborou o Plano de Mitigação e Adaptação às Mudanças do Clima (PMAMC) tendo como um de seus objetivos a neutralização do carbono na cidade até 2049. Para isso, foi levantado as emissões totais do município por meio da elaboração de inventários. Como resultado desse levantamento, em 2018, observou-se a emissão de mais de 3 milhões de toneladas de CO₂ equivalente, os quais 65,1% advêm do setor de transporte, seguido de 21,7% do setor de energia estacionária, que tem seu maior percentual vinculado a geração e utilização de energia elétrica (46%).

Em destaque, ainda sobre o consumo de energia elétrica pelo setor de energia estacionária, estão presentes a forte a participação do subsetor de construções residenciais, comerciais e institucionais, que soma 96% das emissões por eletricidade e em seguida o subsetor de indústria de manufatura e construção com 3,28%.

O PMAMC apresenta estratégias bem objetivas para alcançar a baixa emissão de GEE vinculadas à atividade de construções de edifícios. Dentre as estratégias apresentadas estão:

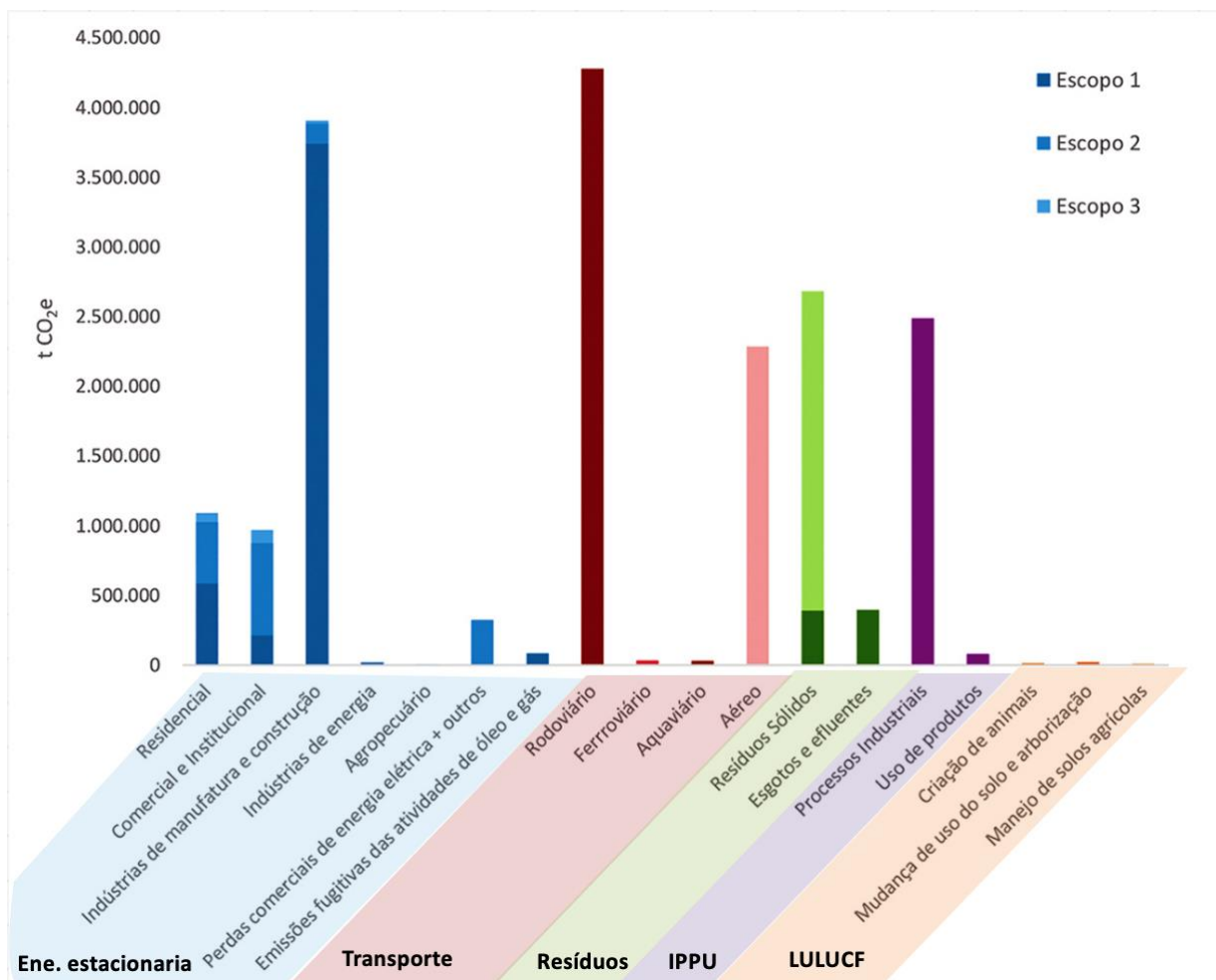
- Implementar o uso do Imposto sobre Propriedade Predial e Territorial Urbana (IPTU Verde, o qual fomenta a realização de ações e práticas de sustentabilidade nas construções por meio da redução de até 10% do imposto até 2024.
- Incentivar a adoção de telhados frios, para promover maior conforto climático para reduzir o consumo de energia com aquecimento ou resfriamento do ambiente até 2032.
- Adotar soluções de adaptação baseada em ecossistemas (AbE) em obras de requalificação de edifícios e espaços públicos até 2032.
- Incentivar a eficiência energética em obras de edificações até 2032;
- Incentivar o IPTU Amarelo, o qual visa estimular proprietários e proprietárias de casas e condomínios a instalarem sistemas de energia fotovoltaica.

c. Rio de Janeiro – Rio de Janeiro

Em 2011 foi definida a Lei nº 5.248 a qual estabelece a Política Municipal de Mudanças Climáticas e Desenvolvimento Sustentável, e que passa a exigir, a partir de 2012, a elaboração de inventários de GEE a cada quatro anos. Além disso, em 2019, criou-se o Decreto nº 46.079 que instituiu o Programa Cidade pelo Clima que visa planejar e executar ações com vistas ao desenvolvimento de baixo carbono da cidade.

Os setores abordados no inventário realizado para os anos de 2012 a 2019 são, energia estacionária, transporte, IPPU, AFOLU e resíduos, sendo os maiores emissores verificados em 2019 o setor de transportes com 35,4% e o de energia estacionária com 34,1%. Na imagem abaixo são apresentados os subsetores de maior emissão no ano de 2019 e como se relacionam com as edificações.

Figura 3 - Emissões de GEE do Município do Rio de Janeiro (2019)



Fonte: Adaptado pela autora do Sistema de Monitoramento das Mudanças Climáticas (SISCLIMA) – Prefeitura do Rio de Janeiro, 2019

O setor de energia estacionária - destacando as atividades referentes à construção civil e edifícios, agrega os subsetores de indústria de manufatura e construção e energia consumida pelos edifícios residenciais, comerciais e institucionais. No ano de 2019, o subsetor da indústria foi o maior emissor, contabilizando 61,1% das emissões do setor da energia estacionária.

Em relação ao setor de IPPU, o qual não aparece entre os setores mais emissores, mas que apresenta subsetores importantes para a atividade do setor da construção civil, teve como grande emissor a produção de ferro e aço, com 95% em 2019, mas que não especificou a produção de outros materiais de construção muito utilizados no Brasil, como exemplo o cimento.

O diagnóstico realizado nos inventários subsidiou a construção do Plano de Desenvolvimento Sustentável e Ação Climática da Cidade do Rio de Janeiro, publicado em 2021. Neste Plano, foram traçadas metas para mitigação das mudanças climáticas por meio da descarbonização de alguns setores. As metas apresentadas no Plano que se destacam para a construção de edificações estão fortemente vinculadas ao uso de energias renováveis, tais como:

- Metas para 2030:
 - Energia: Alimentar 25% das edificações públicas municipais com fontes renováveis de energia;
 - Energia: Aumentar em 5% o uso de energias renováveis distribuídas (energia solar fotovoltaica) em edifícios residenciais;
 - Energia: Garantir que 100% das edificações municipais tenham qualificação Eficiente, no Programa de Benchmarking Energético da Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro;
 - Edificações; Construir 70% dos novos edifícios com padrões de eficiência energética altamente avançados¹⁰;
 - Edificações; Garantir que 100% de iluminação pública seja em LED.

- Metas para 2050:
 - Energia: Aumentar em 25% o uso de energias renováveis distribuídas (energia solar fotovoltaica) em edifícios residenciais;
 - Edificações; Construir 90% dos novos edifícios com padrões de eficiência energética altamente avançados;
 - Edificações; Garantir que 37% dos edifícios residências tenham aquecimento solar de água.

d. Porto Alegre – Rio Grande do Sul

O município de Porto Alegre elaborou um inventário sobre os anos de 2016 a 2019 considerando setores de: energia estacionária, transportes, resíduos, IPPU, AFOLU e outras emissões de escopo 3. De acordo com o inventário (Prefeitura de Porto Alegre, 2021), os subsetores vinculados a construção de edificações estão associados com o setor de energia

¹⁰ O Plano não define o que seria um padrão de eficiência energética altamente avançado.

estacionária, representado por construções residenciais, comerciais e institucionais, além da indústria de manufatura e construção; e está presente no setor de outras emissões de escopo 3 com insumos da construção civil.

Como resultado da avaliação, o município emitiu, em 2019, 2.373 ktCO₂eq., sendo que as emissões relacionadas aos insumos da construção civil – relacionadas com a produção de cimento, ferro e madeira, representaram cerca de 30% do total de emissões da cidade. Com relação ao setor de energia estacionária, observa-se que as edificações residenciais, comerciais e institucionais, somadas, representam cerca de 89% das emissões do subsetor de energia elétrica.

Observando especificamente os subsetores diretamente relacionados com a atividade da construção de edificações, foi possível perceber a forte influência das atividades nas emissões de GEE da cidade. E quando acrescidos os impactos indiretos de setores como o transporte e resíduos, que foram destacados no inventário de Porto Alegre, esse impacto aumenta ainda mais.

Atualmente, o município está elaborando o plano de ação climática a partir dos resultados obtidos no inventário a fim de nortear suas medidas estratégicas de mitigação.

e. Brasília – Distrito Federal

O inventário elaborado para o DF verificou as emissões de GEE dos anos de 2013 a 2018 dos setores de energia, processos industriais e uso de produtos (IPPU), setor de resíduos e efluentes, setor de agropecuária, setor de florestas, uso da terra e mudança do uso da terra (LULUCF). Os resultados apontam que em 2018 a emissão total de GEE no DF foi de 9.518 ktCO₂eq., sendo que os subsetores vinculados às atividades da construção civil e edificações estão associados ao setor de energia¹¹, que foi o maior responsável pelas emissões em 2018, totalizando 48%, e IPPU¹² que totalizou 11% das emissões.

Com base no levantamento feito no inventário, foram elencadas ações a serem traçadas pelos setores avaliados no plano de mitigação das mudanças climáticas do DF, e para esse

¹¹ Com a indústria de manufatura e construção – cimento, metais não ferrosos e químicos, e consumo energético comercial, institucional e residencial.

¹² Com a produção de cimento.

estudo destacam-se as ações relacionadas, direta ou indiretamente, com as atividades da construção de edifícios sendo elas:

- o uso de combustível derivado de resíduos (CDR) na produção de cimento do DF, indicando a redução de 218.317tCO₂eq¹³;
- redução das emissões de GEE por reciclagem, indicando a redução de 79.411tCO₂eq;
- efficientização dos prédios públicos do GDF, indicando a redução de 54 tCO₂eq.

Apesar do plano apresentar questões vinculadas as atividades da construção de edifícios, o diagnóstico não apresenta um valor específico de emissões totais de base para esse setor, e não inclui ações mais específicas para esse problema, pois apenas indica a efficientização de edifícios públicos sem maior detalhamento.

Com relação ao plano de mitigação, o Governo da capital federal, em 2012, editou a lei distrital n° 4.797¹⁴ cujo objetivo é “assegurar a contribuição do DF no cumprimento dos propósitos da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas de alcançar a estabilização das concentrações de GEE na atmosfera”. A lei estabelece 17 (dezesete) diretrizes para apoiar na elaboração do plano de política ambiental do DF, e para esse estudo destaca-se a diretriz V, a qual menciona a:

V. Formulação e integração de normas de planejamento urbano e uso do solo, com a finalidade de estimular a mitigação da emissão de gases de efeito estufa e promover estratégias de adaptação aos impactos da mudança do clima;

Ademais, em especial, sobre a Seção V da Construção, os artigos mencionados contemplam as seguintes estratégias:

Art. 11. As edificações novas a serem construídas no Distrito Federal deverão obedecer a critérios de eficiência energética, conforto e sustentabilidade ambiental e qualidade e eficiência de materiais, conforme definição em regulamentos específicos.

¹³ “A utilização do combustível derivado do resíduo (CDR) é uma meta importante no DF. Na rota tecnológica de 2030 da SLU, a ideia de ação é a mitigação no setor de cimento, utilizando 120 mil toneladas de combustível derivado de resíduos (CDR) gerados nos tratamentos de resíduos por ano.” (GDF, 2021)

¹⁴ Lei Distrital n° 4.797 de 06 de março de 2012, que estabelece princípios, diretrizes, objetivos, metas e estratégias para a Política de Mudança Climática no âmbito do DF. https://www.sinj.df.gov.br/sinj/Norma/70740/Lei_4797_06_03_2012.html

Art. 12. As construções existentes, quando submetidas a projetos de reforma e ampliação, deverão obedecer a critérios de eficiência energética, arquitetura sustentável e sustentabilidade de materiais, conforme definições em regulamentos específicos.

Art. 13. Serão observados os conceitos de eficiência energética e ampliação de áreas verdes nas edificações de habitação popular projetadas pelo Poder Público.

Art. 14. O projeto básico de obras e serviços de engenharia contratados pelo Distrito Federal que envolvam o uso de produtos e subprodutos de madeira somente poderá ser aprovado pela autoridade competente caso contemple, de forma expressa, a obrigatoriedade do emprego de produtos e subprodutos de madeira de origem exótica, ou de origem nativa que tenha procedência legal. *(Artigo vetado pelo Governador, mas mantido pela Câmara Legislativa do Distrito Federal).*

Somadas as estratégias anteriores, outras duas, vinculadas a pauta energética (Seção III) e de resíduos (Seção IV), também apoiam diretamente as estratégias da construção, sendo elas:

Art. 8º São estratégias para o uso racional da energia: (Legislação correlata - Lei 6266 de 29/01/2019)

V – promoção da rotulagem de produtos e processos eficientes, sob o ponto de vista energético e de mudança do clima;

Art. 9º São estratégias para a redução da geração de resíduos sólidos no Distrito Federal:

II – reciclagem ou reuso de resíduos sólidos urbanos, inclusive do material de entulho proveniente da construção civil e da poda de árvores, de esgotos domésticos e de efluentes industriais;

A partir do arcabouço legal do DF sobre mudança do clima, que envolve não somente a lei nº 4.797, mas também as leis nº 4.136/2008 e nº 5.624/2016 - essas duas que estão mais direcionadas a promoção do plantio de mudas de árvores, são elaborados o inventário de emissão de GEE e o plano de mitigação e adaptação do DF.

1.1.3 Análises dos planos sob a construção de edifícios

Em resumo, todos os planos apresentados definem suas estratégias com base na disponibilidade de dados levantados nos inventários. Dentre os inventários das cinco cidades apresentadas apenas Porto Alegre fez menção direta ao impacto do setor da construção civil, no entanto outras cidades, como Salvador, Rio de Janeiro e Brasília comentaram impactos indiretos advindos da indústria e consumo energético de edificações. Além disso, o plano de

Salvador se mostrou o mais alinhado com metas voltadas para edifícios sustentáveis e preparado para implementar ações estratégicas, pois trouxe estratégias objetivas para este tema.

Outras reflexões que partem do observado nos planos e inventários das cidades selecionadas estão relacionadas com os limites geográficos da metodologia de inventários na escala urbana (NBR 14.064), e à falta de informações técnicas sobre materiais da construção com relação a sua produção.

Em relação a metodologia de inventários para áreas urbanas Dodman (2009) comenta como o hiato de informações e a falta de padronização das informações levantadas são desafios presentes. A contabilização das emissões considerando as fronteiras geográficas ou vinculadas à demanda de consumo de diferentes regiões são um desafio (CONCEIÇÃO, 2017). Pois as emissões advindas de alguns relevantes serviços e produtos podem não ser contabilizadas quando seguem a metodologia baseada no princípio territorial (DODMAN, 2009). A título de exemplo do que foi avaliado nas cinco cidades, é que não fica claro nos inventários apresentados anteriormente a contabilização de importantes indústrias e processos para a construção de edifícios, como as indústrias de cimento ou ferro e aço, por não estarem dentro do limite geográfico do município, mesmo que o município consuma o produto da indústria em outra região.

Também se constatou com a avaliação dos inventários e planos das cidades apresentados, a falta de informações técnicas sobre os materiais de construção de edifícios produzidos por grandes indústrias – vidro, alumínio, cimento, aço, tintas, isolantes etc., motivado da falta da coleta de dados sobre os impactos ambientais relacionados a produção do material. Portanto, é necessário que os agentes da cadeia produtiva da construção brasileira tenham acesso a ferramentas que facilitem a coleta de dados sobre a emissão de GEE advinda da produção dos materiais e produtos vinculados a construção de edifícios (LÜTZKENDORF; BALOUKTSI, 2016; SILVA, 2003). E que também sejam motivados por políticas de incentivo de mercado para que façam a coleta de dados com o objetivo de divulgar as informações técnicas sobre os impactos ambientais, para que essas informações apoiem as decisões de projetos de edifícios com menor emissão incorporada de GEE (JOHN et al., 2020).

1.1 O conceito *Zero Carbon Building* (ZCB)

Com a ampliação da pauta de descarbonização da atividade da construção de edifícios, muitos países começaram traçar metas e organizar o seu mercado com esse objetivo, como foi o caso do Governo do Reino Unido que iniciou a discussão sobre o conceito *Zero Carbon Building* (ZCB) em 2006.

O edifício carbono zero é uma adaptação do conceito de edifícios com zero carbono, em inglês *Zero Carbon Buildings* (ZCB), que para (STOYKE, 2018) são edifícios de alto desempenho que levam em consideração a redução de 100% da emissão líquida (*net-emission* em inglês) através da produção de energia renovável local ou comunitária. Esse conceito foi introduzido em 2006 pelo governo do Reino Unido de forma a atender a categoria 6, direcionada à poluição, do *Code for Sustainable Homes*.

A definição de um edifício carbono zero tem sido muito discutida no Reino Unido com o objetivo de ampliar o escopo do conceito ZCB para incluir o impacto de todo o ciclo de vida de novas e, principalmente, construções antigas (UKGBC, 2019), pois nas primeiras estruturas políticas britânicas se associavam os edifícios carbono zero ao carbono emitido proveniente apenas da emissão operativa, vinculada ao consumo de energia (IBN-MOHAMMED et al., 2013). No entanto, há uma mudança nessa definição que amplia em mais abordagens, como o *zero carbon building - operational CO₂ emission* (ZCB_{OE}) e o *zero carbon building embodied CO₂ emission* (ZCB_{EE}) (ABEYDEERA; MESTHRIGE; SAMARASINGHALAGE, 2019; JI et al., 2020)

No Quadro 1 abaixo estão relacionadas algumas terminologias associadas as definições que são utilizadas por instituições e autores mais próximos ao conceito de emissão incorporada ZCB_{EE}.

Quadro 1- Terminologia de Edifícios Carbono Zero que consideram a emissão incorporada de GEE verificadas a partir de 2019

Referência/s	Terminologia	Principais requerimentos da definição
Becqué et al., 2019	<i>(Net)-zero carbon building + embodied carbon</i>	Emissão de CO ₂ equivalente da construção e operação iguais a zero ou equilibrado por ações de compensação das emissões incorporadas na construção do edifício.
UKGBC (2019)	<i>Carbono net-zero – construction</i>	Emissão zero ou negativa de carbono relacionada ao produto e a construção do edifício por meio da compensação do carbono ou utilização de energia renovável.
	<i>Carbono net-zero – whole life</i>	Emissão de carbono zero ou negativas relacionadas a emissão de GEE embutida e operacional do edifício em toda sua vida útil, incluindo a demolição, com estratégias de eficiência energética, uso de energias renováveis e compensação de carbono.
Climate Active, 2020	<i>Carbon-neutral— whole building operations</i>	Emissões totais da operação do edifício e equipamentos a serem monitorados e compensados.
USGBC, 2020	<i>(LEED) Zero-Carbon building</i>	Emissão de energia a ser monitorada e compensada por energias renováveis in loco ou fora do local e com a compra de crédito de carbono.
CaGBC, 2021	<i>Zero-Carbon Building</i>	Edifício altamente eficiente energeticamente com produção de energia renovável ou compensação de carbono em alta quantidade em função dos materiais, construção e operação do edifício.

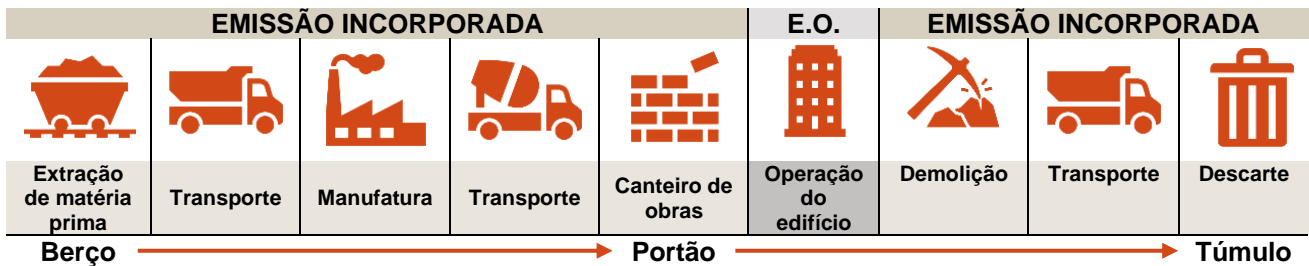
Fonte: Adaptado de CAUSONE; TATTI; ALONGI (2021).

Diversos estudos apontam para um crescimento significativo nas emissões incorporadas dos edifícios (D'AMICO; POMPONI; HART, 2021; DIXIT et al., 2010), principalmente pelo fato do avanço tecnológico voltado para dirimir as emissões operativas. Ainda destacando a definição de emissão incorporada de GEE, a literatura aponta que existem poucas medidas vinculadas aos materiais de construção e seus processos de construção de edifícios (ABEYDEERA; MESTHRIGE; SAMARASINGHALAGE, 2019; HERNANDEZ; KENNY, 2010; IBN-MOHAMMED et al., 2013; KHAN et al., 2022). E Cabeza et al. (2013), destaca que uma das causas da falta de medidas sobre as emissões incorporadas no setor da construção de edifícios seria a falta de métodos de cálculo consistentes e assertivos disponíveis.

1.2 Edifícios de baixa emissão incorporada de GEE

O carbono incorporado, também denominado emissão incorporada de GEE, aborda os gases de efeito estufa emitidos durante todos os processos necessários para a construção, sendo alguns exemplos: a extração de matéria prima, manufatura, transporte, construção, operação, manutenção, renovação e demolição (IBN-MOHAMMED et al., 2013; JI et al., 2020; LANGSTON; LANGSTON, 2008) (Figura 4).

Figura 4 - Processos iniciais de produção da construção



No caso específico do carbono incorporado, pode haver tanto a emissão quanto o sequestro, como por exemplo, no processo de produção de cimento há a emissão e no processo de crescimento da madeira há o sequestro, também denominado de absorção de CO₂ (GUSTAVSSON; JOELSSON; SATHRE, 2010; RICS, 2017).

Como já comentado, a redução das emissões de GEE incorporadas advindas dos edifícios é uma importante estratégia a ser considerada nos planos nacionais (regionais) e municipais (locais) para atingir as metas globais de redução da emissão de GEE (D'AMICO; POMPONI; HART, 2021; DE WOLF; POMPONI; MONCASTER, 2017). Muito tem sido considerado nas políticas de diferentes esferas de governo no que diz respeito ao carbono operativo, relacionado com o uso da edificação e seu consumo energético, porém também é necessária a criação de políticas voltadas para a redução as emissões de GEE incorporadas (GIORDANO et al., 2015).

O conceito de emissões incorporadas de GEE trabalhado pela International Energy Agency (IEA) e a Energy in Buildings and Communities Programme (EBC), se define pelas emissões de GEE juntamente com a energia consumida nas etapas de produção, construção, manutenção, reparos e reformas e demolição (LÜTZKENDORF; BALOUKTSI, 2016). No entanto, outros autores trabalham com diferentes definições que também se associam as fronteiras adotadas para as emissões que serão incluídas nas análises. A título de exemplo

em algumas literaturas se utilizam o termo carbono embutido / incorporado (ANDERSON; THORNBAC, 2012; RICS, 2012) além de outros apresentados na Tabela 3 abaixo:

Tabela 3 - Definições e fronteiras definidas para emissões incorporadas

Fonte	Definição	Fronteira do sistema
Sustainable Homes, 1999	A energia embutida / incorporada de um edifício é, portanto, a energia total necessária para construí-lo, ou seja, para extrair as matérias primas, processá-las fabricá-las conforme a necessidade e transportá-las para o local onde será construído o edifício.	Do berço ao final da construção
Crowther, 1999	A energia embutida / incorporada do edifício pode ser definida como a energia total necessária para a construção do edifício incluindo a energia direta utilizada no canteiro de obras, durante sua construção e montagem, e energia indireta necessária para fabricar os materiais e componentes dos edifícios.	Do berço ao final da construção
Upton et. Al, 2008	A energia embutida / incorporada inclui as energias associadas para a obtenção das matérias-primas, para a manufatura dos materiais de construção, para o transporte dos materiais até o canteiro de obras e para a construção das estruturas do edifício. Além disso, a energia embutida é calculada como energia embutida total e como energia embutida não renovável (total menos energia hidrelétrica e biomassa).	Do berço ao final da construção
SIA 2032, 2010	As emissões cinzas de GEE são a quantidade acumulada dos gases: dióxido de carbono, metano, óxido nítrico e outros, responsáveis pelo aquecimento global, produzidos durante todos os processos a montante, desde a extração da matéria prima até a produção, construção, demolição e transporte entre os processos. Esta quantidade acumulada é expressa em CO2 equivalente, que tem o mesmo efeito causado pelos gases de efeito estufa como a soma das emissões de GEE.	Berço ao túmulo
Knight and Addis, 2011	O CO2 embutido / incorporado é uma medida das emissões de dióxido de carbono resultantes da energia utilizada para extrair matéria prima, fabricar componentes e montá-los, transformando num edifício, ou seja do berço ao portão da obra.	Berço ao local da obra
Monahan and Powell, 2011	O carbono embutido / incorporado é a emissão de CO2 produzida durante a extração de recursos, transporte, a manufatura, a montagem, a desmontagem e o descarte, no fim da vida de um produto. Na construção, a maior parte do CO2 é produzida a partir da queima de combustíveis fósseis. Também são libertadas quantidades significativas de CO2 através de processos de conversão química durante a fabricação de cimento. O carbono incorporado é dado em kg ou toneladas de CO2.	Berço ao túmulo
Anderson and Thornback, 2012	O carbono embutido / incorporado é o dióxido de carbono ou as emissões de gases com efeito de estufa associadas à fabricação e à utilização de um produto ou serviço. Para os produtos de construção, isto significa as emissões de CO2 ou de GEE associadas à extração, manufatura, transporte, instalação, manutenção e demolição dos materiais.	Berço ao túmulo
RICS, 2012	Carbono embutido / incorporado são as emissões de carbono associadas ao consumo de energia (energia incorporada) e aos processos químicos durante a extração, a fabricação, o transporte, a montagem, a substituição e a demolição de materiais ou produtos da construção. O carbono incorporado pode ser medido do berço ao portão, do berço ao portão, do berço ao fim da construção, do berço ao túmulo ou mesmo do berço ao berço. Os conjuntos de dados típicos de carbono incorporado são do berço ao portão. O carbono incorporado é normalmente expresso em quilogramas de CO2e por quilograma de produto ou material.	Berço ao portão Berço ao local da obra Berço ao final da construção Berço ao túmulo

		Berço ao berço
--	--	----------------

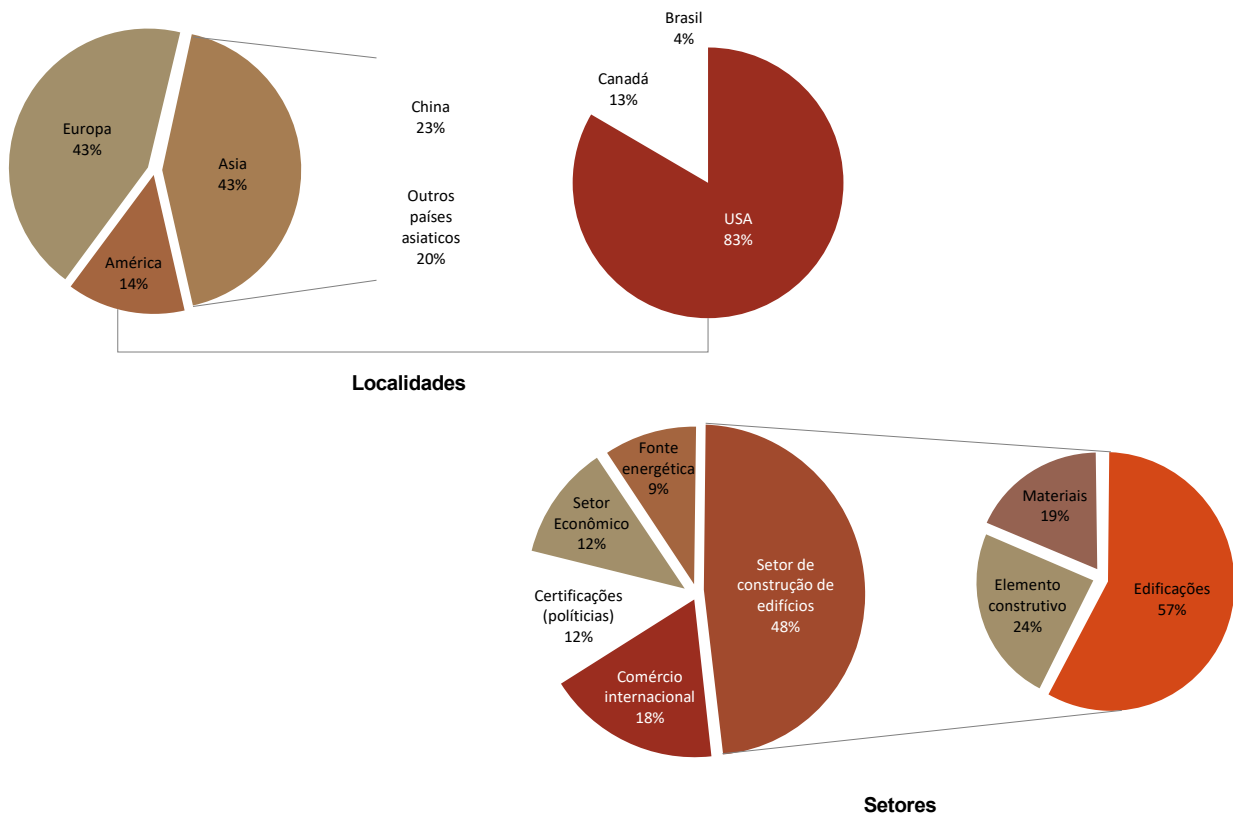
Fonte: traduzido de LÜTZKENDORF; BALOUKTSI (2016)

Ao trabalhar a definição do conceito de emissão de GEE incorporada, alguns parâmetros importantes se abrem para entendimentos diferentes, sendo eles: os tipos de gases de efeito estufa considerados na avaliação, a caracterização do fator de conversão dos GEE em CO₂ equivalente, diferentes fontes de emissão de GEE e o sequestro de carbono ou o armazenamento de carbono em materiais (LÜTZKENDORF; BALOUKTSI, 2016). Neste caso especificamente, e de acordo com Forster et al. (2007), os GEE de longa duração são o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), clorofluorcarbonos (CFC), hidroclorofluorcarbonos (HCFC), hidrofluorcarbonos (HFC), perfluorcarbonos (PFC) e hexafluoreto de enxofre (SF₆).

De acordo com a revisão de literatura realizada Chang-u; Sunghee, (2016) a IEA com coordenação da EBC, identificaram 250 literaturas que abordam o tema de emissões de GEE incorporadas em edifícios. Foram verificados nos estudos dados sobre as regiões de estudo, os tipos de edifícios e os tipos de componentes dos edifícios referentes as metodologias, cálculos e base de dados. É importante verificar os resultados dessa revisão para entender as principais tendências e gargalos dos estudos sobre emissão de GEE incorporada na construção de edifícios.

Sobre as regiões mundiais, os resultados obtidos mostram que dentre os 14% dos estudos realizados na América Latina, apenas 4% foram realizados no Brasil, sendo que 48% dos estudos eram especificamente direcionados ao setor de edificações (Gráfico 1).

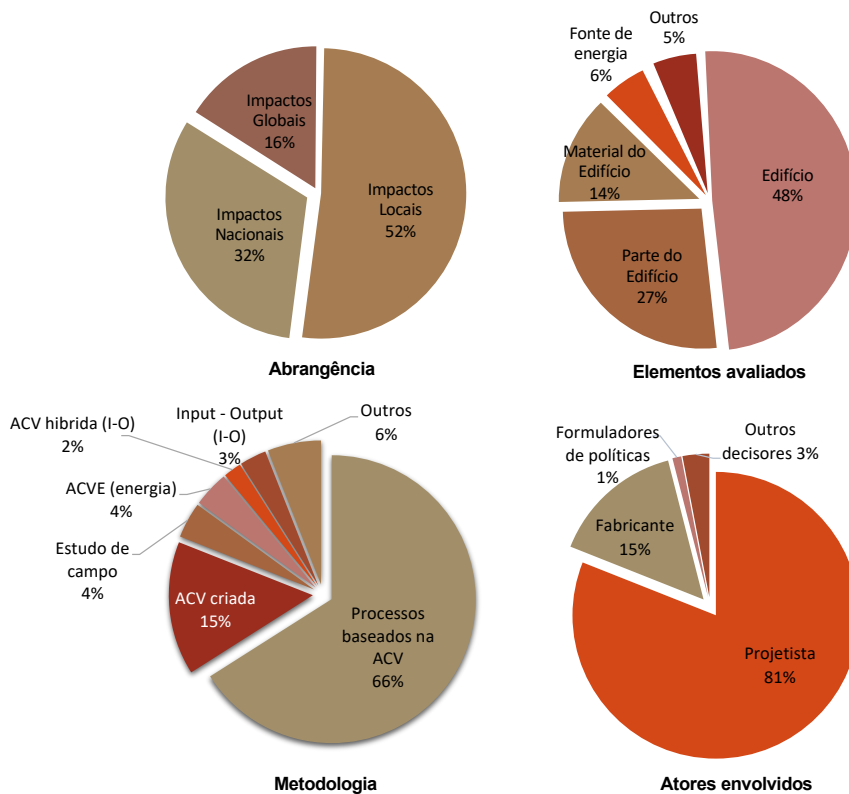
Gráfico 1 – Tendência mundial dos estudos sobre emissões incorporadas por setor



Fonte: Traduzido de CHANG-U e SUNGHEE (2016)

As literaturas analisadas têm, em sua maioria, enfoque nos impactos locais (52%), sendo que dentro desse cenário, o principal tópico eram os edifícios (48%), seguido dos componentes dos edifícios (27%) e materiais (14%). Além disso, a maior parte dos estudos apontam que, dentro do universo local, a metodologia mais utilizada se baseia nos processos da ACV (66%), ou foram criadas com base na ACV (15%) - como *GHG protocol*, balanço de material e energia, classificação de edifícios ou questionários. E a grande maioria dos estudos foram direcionados para os projetistas, com 81% (Gráfico 2).

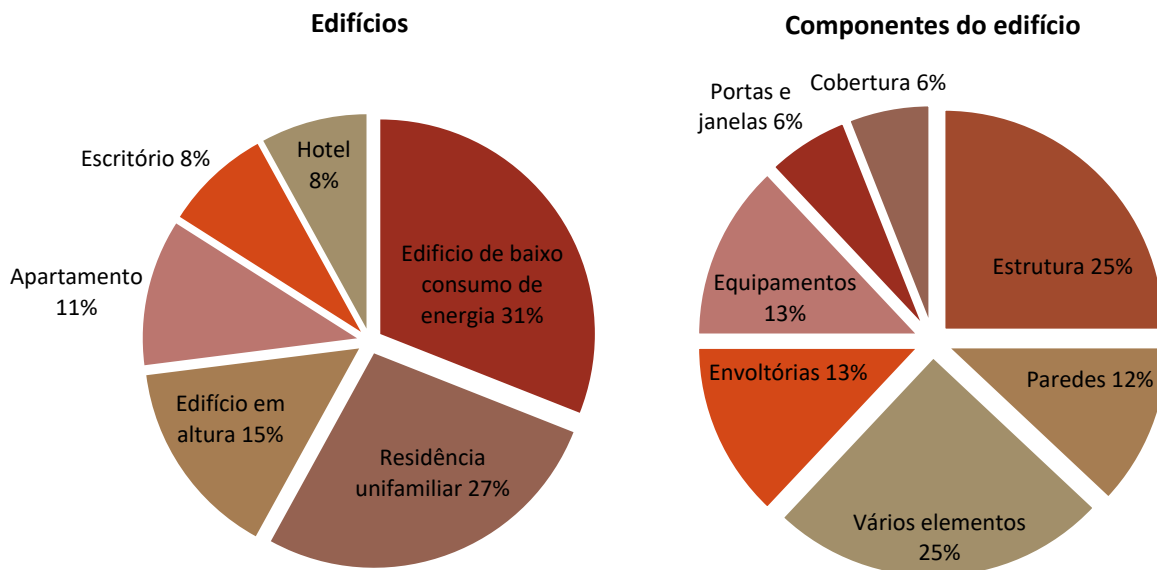
Gráfico 2 – Influência dos impactos ambientais locais verificados na revisão de literatura



Fonte: Adaptado de CHANG-U; SUNGHEE (2016)

Adentrando no tema dos **edifícios**, 42 artigos foram analisados sobre a emissão de GEE incorporada na escala do edifício, e mais de 80% estudos foram feitos para a tipologia residencial. Dentro deste arranjo, apenas 15% foram realizados para edifícios de vários andares e 11% dos estudos foram realizados para edifícios residenciais em altura (apartamentos). Já sobre os **componentes dos edifícios**, 21 artigos foram analisados e, dentre eles, observou-se a prevalência de estudos para estrutura e vários elementos (25%), além de envoltórias e equipamentos, ambos com 13%. E sobre os **materiais de construção**, dentre os 17 artigos analisados observou-se alguns materiais de construção analisados como: bloco cerâmico, madeira, telha cerâmica, concreto, blocos leves, granito, agregado, cimento, cobre, alumínio, vidro, materiais de isolamento – celulose e lã de mineral, acabamentos e plástico (Gráfico 3).

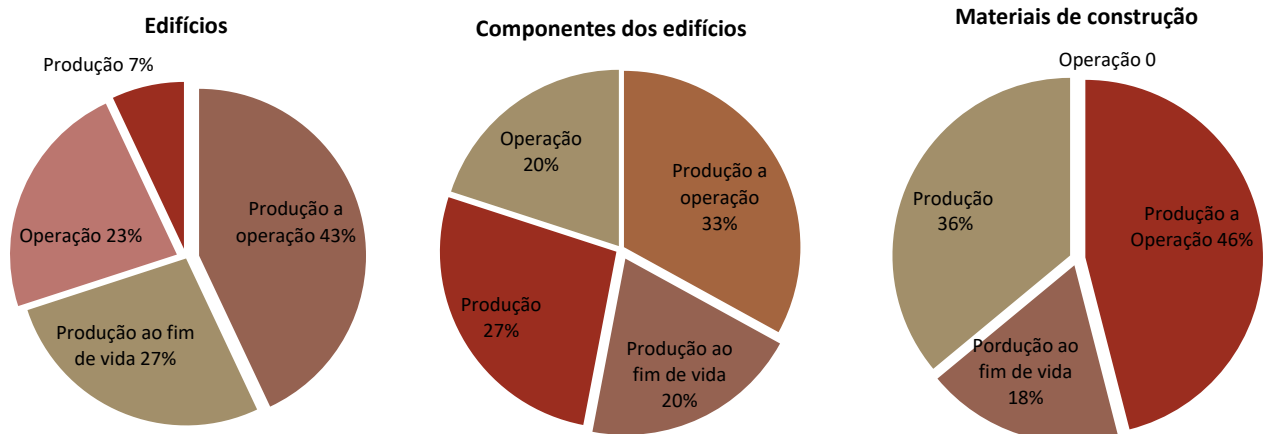
Gráfico 3 - Principais tipologias de edifícios e componentes verificados na revisão de literatura



Fonte: Adaptado de CHANG-U; SUNGHEE (2016)CHANG-U; SUNGHEE (2016)

Sobre as fronteiras definidas para os **edifícios**, a análise sobre os estudos apresentou um resultado bem equilibrado, prevalecendo estudos das etapas de produção e operação com 32%, em seguida as etapas de produção ao fim de vida com 27% e apenas 7% estudaram apenas as etapas de produção. Com relação aos **componentes dos edifícios**, observa-se a predominância das etapas iniciais de produção e operação (33%) e apenas produção (27%). Por fim, para os estudos sobre os **materiais de construção**, observou-se o mesmo padrão de estudos realizados para os componentes sobre as etapas de produção e operação (46%) e apenas produção (36%) (Gráfico 4).

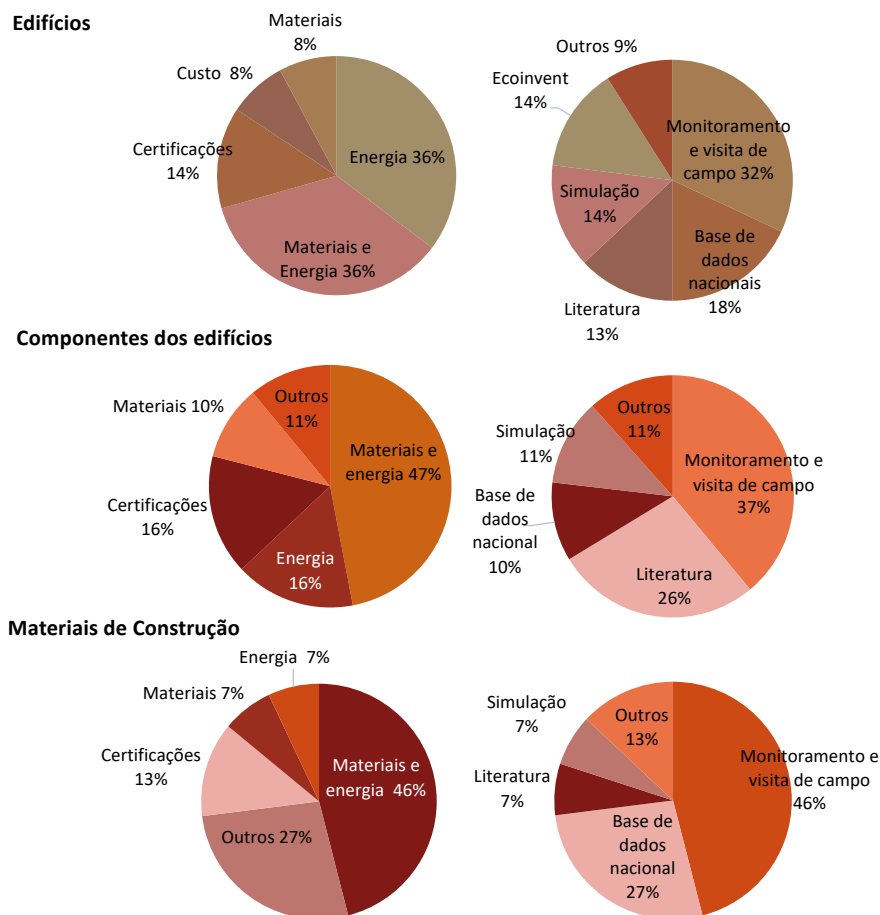
Gráfico 4 – Definição das fronteiras de análise verificada na revisão de literatura



Fonte: Adaptado de CHANG-U; SUNGHEE (2016)CHANG-U; SUNGHEE (2016)

Os parâmetros de cálculo mais utilizados nos estudos dos **edifícios** foram para avaliar dados de energia (36%) e dados de material do edifício e energia (36%), e dentre as bases de dados mais utilizadas foram utilizados o monitoramento em campo (32%) e bases nacionais (18%), sendo que o Ecoinvent apareceu em 14% dos estudos. Já sobre os **componentes dos edifícios**, esse cenário varia um pouco, mantendo a prevalência dos parâmetros de cálculo para materiais e energia (47%) e energia (16%), e com as bases de dados mais utilizadas sendo o monitoramento em campo (32%), em seguida a literatura (26%) e permanecendo baixa a incidência de estudos com Ecoinvent (5%). Com relação aos **materiais dos edifícios** o parâmetro de cálculo de materiais e energia também se manteve o mais observado nos estudos, com 46% e em seguida apresenta-se outros cálculos, como viabilidade econômica, aceitação social, uso do solo e outros com 27%. Já para a base de dados também se repete o monitoramento em campo como a mais utilizada com 46% e em seguida as bases de dados nacionais com 27%. Neste caso, o Ecoinvent nem aparece nos estudos (Gráfico 5).

Gráfico 5 - Principais parâmetros de cálculos e base de dados verificados na revisão de literatura



Fonte: Adaptado de CHANG-U; SUNGHEE (2016)CHANG-U; SUNGHEE (2016)

A partir do exposto no resultado da revisão de literatura realizado no trabalho da IEA (2016) sobre emissões de GEE incorporadas em edifícios, é possível verificar a importância de temas que promovam o aumento dos estudos comparativos na área. Portanto, para isso, é essencial abordar temas de normatização, padronização, definição de conceitos, metodologias, ferramentas de estudo e coleta de dados que apoiem nesse processo. Assim, serão apresentados abaixo os subcapítulos sobre as normas, metodologia, conceitos e ferramentas existentes que apoiam e podem apoiar na construção de edifícios de baixa emissão de GEE incorporada para o contexto brasileiro.

1.2.1 Normas para edifícios de baixa emissão incorporada de GEE

Para realizar estudos comparativos sobre o impacto de edifícios com relação a emissão de GEE é essencial que existam informações sobre o tipo do edifício, seu uso, técnicas construtivas, principais materiais, fronteiras do sistema e outros (LÜTZKENDORF; BALOUKTSI, 2016). Portanto, é imprescindível que haja a normatização de métodos de avaliação do impacto de edifícios sob a perspectiva de emissões de GEE incorporada – também incluindo os impactos dos materiais e componentes que compõem os edifícios, para aumentar a quantidade de estudos comparáveis e, conseqüentemente, ampliar as informações compartilhadas sobre o impacto dessa atividade nas mudanças climáticas.

Dessa forma, existem algumas normas internacionais que formalizam e padronizam metodologias e estudos de avaliação do impacto ambiental da construção de edifícios e os materiais de construção que os compõem (SIMONEN et al., 2019), sendo destacadas neste estudo as normas europeias EN 15.978 e EN 15.804, precursoras na avaliação sobre o impacto da emissão de GEE específicas para edifícios e seus componentes e materiais, e as normas da *International Organization for Standardization* (ISO) 14.040, 14.044 e 14.067 que estão detalhadas abaixo:

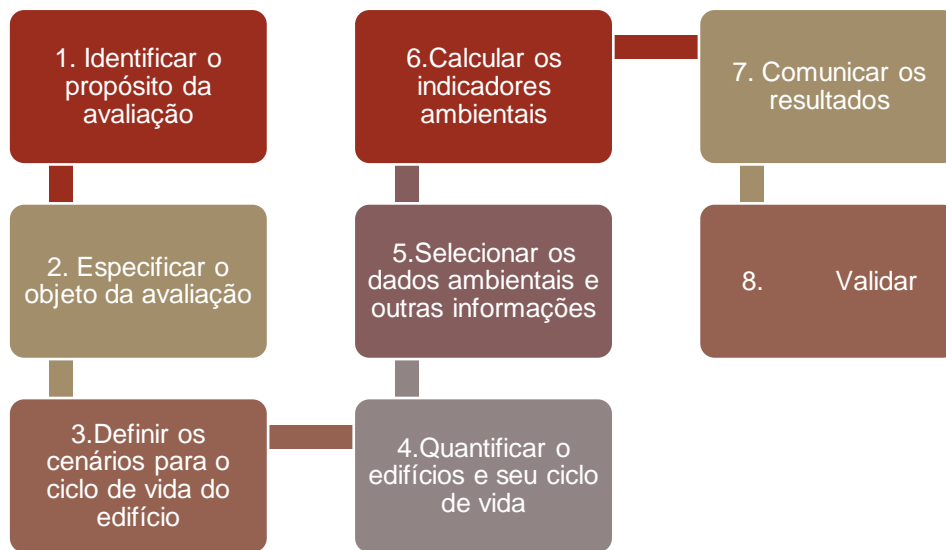
a. EN 15.978 – *Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method.*

Essa norma verifica a performance ambiental de um edifício de modo completo baseado na metodologia da avaliação do ciclo de vida (ACV) e outras avaliações ambientais. Também utiliza dados obtidos nas *Environmental Product Declarations* (EPDs), que são normatizadas

pela EN 15804, sendo aplicável para edifícios novos, existentes e projetos de reforma (BROER et al. 2022).

A norma descreve os objetivos das avaliações, as fronteiras dos sistemas aplicados ao edifício avaliado, o procedimento para usar a análise de inventários, os indicadores e os procedimentos de cálculo, os requerimentos para se apresentar os resultados e os dados necessários para os cálculos (Figura 5).

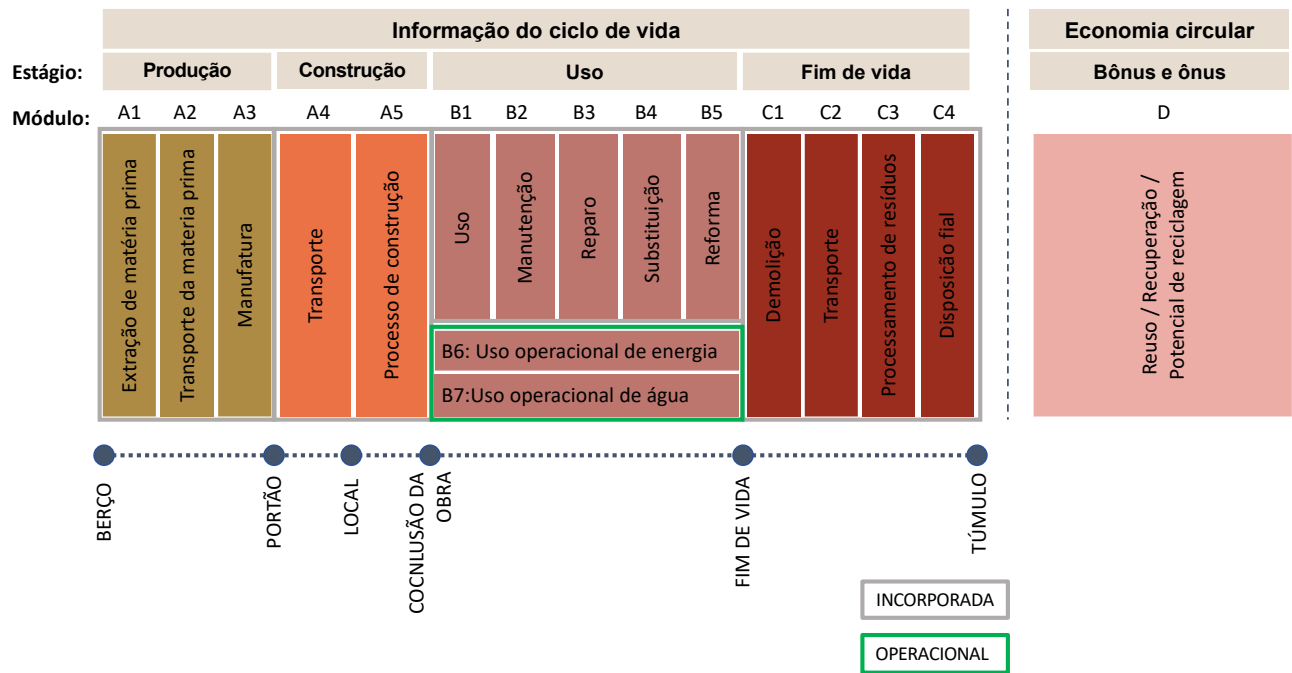
Figura 5 - Fluxo processual da ACV



Fonte: adaptado da EN15.978: 2011

Os diferentes estágios considerados na ACV representam um conjunto de processos, sendo denominados de berço ao portão – no caso dos estágios A1-A3 e berço ao túmulo – no caso dos estágios A1-C4, que estão vinculados a módulos de atividades, como transporte, manufatura, construção, uso, manutenção e outros (Figura 6).

Figura 6 – Estágios do ciclo de vida da edificação.



Fonte: Adaptada da EN 15.978:2011.

b. EN 15.804 – Sustainability of construction works. Environmental product declarations. Core rules for the product category of construction products

A norma em questão está focada na avaliação de sustentabilidade de variados materiais e produtos, incluindo componentes de edifícios. Essa norma é a que embasa a elaboração das EPDs com o objetivo de comunicar informações dos materiais e produtos para a sociedade. Pela norma, é obrigatória a inclusão de dados sobre as etapas de extração e manufatura dos materiais e produtos também denominadas de A1-A3 (BROER et al. 2022).

O fluxo proposto pela norma é igual ao proposto pela EM 15.978, apenas diferindo o tipo de sistema que está sendo analisado, que, neste caso, seriam produtos e materiais e não edifícios inteiros. Essa norma é um instrumento essencial para a elaboração de banco de dados sobre os materiais e produtos utilizados nos edifícios com informações padronizadas – o que facilita comparar materiais de diferentes fabricantes. Somente a partir de um banco de dados consolidado e regionalizado será possível fomentar um mercado adaptado para a construção de edifícios de baixa emissão incorporada de GEE.

c. Normas ISO 14.000

De acordo com (SANTOS et al., 2011; SILVA, 2003), a metodologia ACV foi normatizada na década de 90 a partir da elaboração da série de normas ISO 14.000, baseada na definição estabelecida pela SETAC, e a partir disso, houve uma certa padronização dos dados coletados por meio de metodologias que permitiu ampliar os estudos comparativos entre edifícios. As duas normas brasileiras específicas para a ACV vigentes são:

- ISO 14.040 (2014). Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – princípios e estrutura. Nesta norma são definidos os princípios elementares e a estrutura para a elaboração e divulgação dos resultados da ACV;
- ISO 14.044 (2014). Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – requisitos e orientações. Nesta norma são detalhados os requisitos e orientações para realizar o estudo da ACV.

1.2.2 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de edificações

Para tornar viável a descarbonização do setor da construção civil é preciso compreender de maneira holística os atores e ações responsáveis por cada etapa do ciclo de vida do edifício (OSMANI; O'REILLY, 2009) além de compreender a fundo o processo e componentes para produzir e operar um edifício. Dessa maneira, diversos métodos e estudos estão sendo considerados para avaliar o impacto e desempenho ambiental de edifícios, sendo um deles a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Essa metodologia foi definida inicialmente pela *Society for Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC) como:

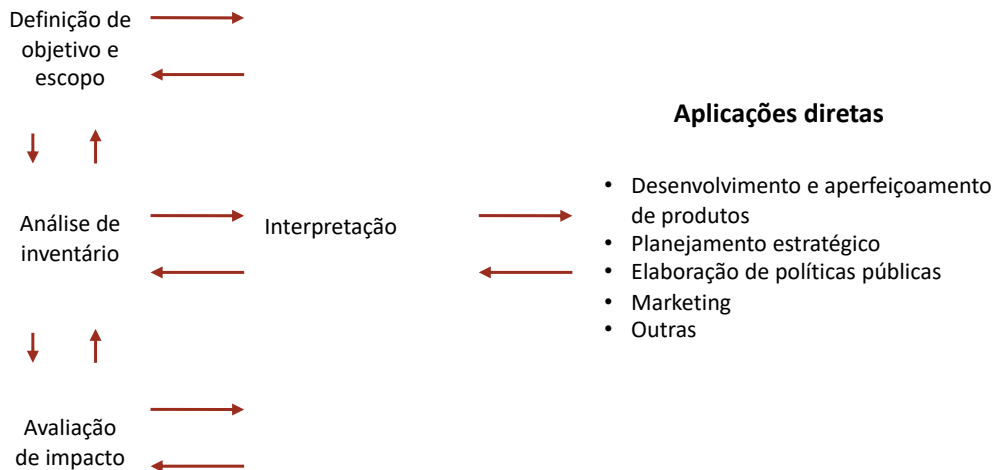
“um processo objetivo para avaliar os impactos ambientais associados a um produto, processo ou atividade pela identificação e quantificação da energia e uso de matéria e emissões no meio ambiente, e avaliar e implementar oportunidades de realizar melhorias ambientais. A avaliação inclui todo o ciclo de vida de um produto, processo ou atividade englobando a extração e o processamento de matéria prima, manufatura, transporte e distribuição, uso, reuso, manutenção, reciclagem e disposição final” (SETAC, 1991).

Apesar dos primeiros estudos ACV terem sido realizados na década de 60, com estudos focados em diferentes tipos de embalagens, a metodologia perdurou e ampliou seus estudos na década de 70 em pleno cenário de crise do petróleo (SANTOS et al., 2011). O estudo da ACV que se apresenta na NBR 14.040 é dividido em quatro etapas principais, sendo elas: i.

Definição dos objetivos e escopo, ii. Inventário do ciclo de vida (ICV), iii. Avaliação dos impactos (AICV), e iv. Interpretação dos impactos, como apresentado na Figura 7 abaixo:

Figura 7 - Estrutura de avaliação de ciclo de vida

Estrutura de avaliação de ciclo de vida



Fonte: Adaptado da NBR 14.040

1.2.2.1 Definição do objetivo e escopo

Na ACV de um edifício é primordial identificar questões a serem respondidas ao longo do processo (KHASREEN; BANFILL; MENZIES, 2009), para posteriormente definir o escopo – o qual define o objetivo do estudo (PASSUELLO et al., 2014), além de definir a unidade funcional do produto, as fronteiras do sistema, a categoria de impacto dentre outros itens.

A definição do escopo se dá pelo entendimento das diferentes fronteiras do estudo, tanto territoriais como dos estágios de avaliação dos processos. A ACV pode ser completa, também conhecida como “berço ao túmulo” (em inglês *cradle-to-grave*) (CALDAS et al., 2017), ou pode ser realizada apenas uma parte, também conhecida como “berço ao portão” (em inglês *cradle-to-gate*), o qual foca na avaliação da extração da matéria prima até a saída do portão da indústria para a distribuição até o local da construção (RUSSELL-SMITH; LEPECH, 2015). Esses estágios foram melhor definidos a partir da norma europeia EN 15.978 de 2011 (Figura 6).

1.2.2.2 Análise de inventário do ciclo de vida (ICV)

Nesta fase são levantados e calculados os dados de entrada e saída do sistema de um material ou produto (PASSUELLO et al., 2014), que de acordo com a NBR 14.040, é uma análise interativa, pois depende dos dados que são encontrados, ou não, sobre o sistema analisado que podem, inclusive, impactar no objetivo e escopo anteriormente definido para a ACV. As principais fases consideradas no levantamento dos dados de entrada e saída são extração do recurso natural, manufatura do produto, transporte, uso e descarte (SANTOS et al., 2011).

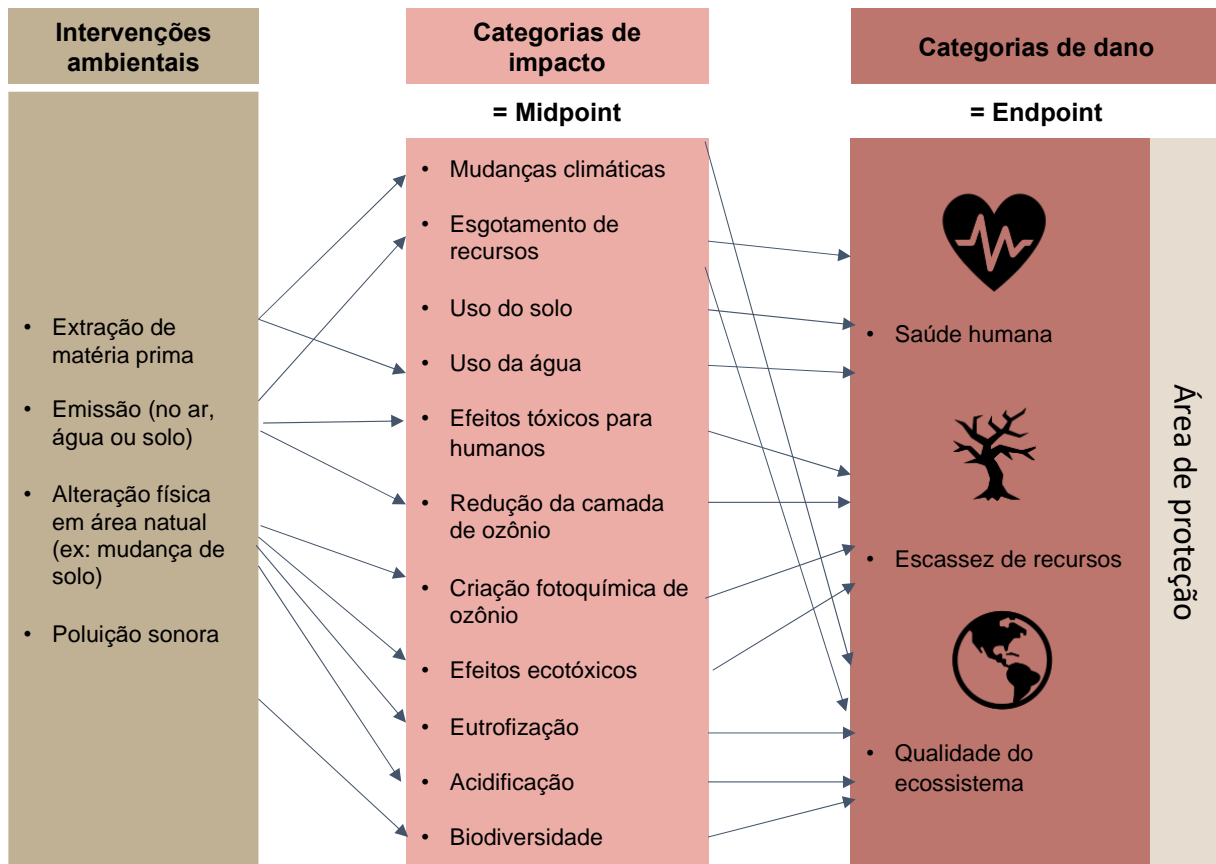
1.2.2.3 Avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV)

Esta etapa avalia os impactos ambientais relacionados com a produção de um material ou produto que são relacionados a um método matemático definido no processo da ACV que associa à uma categoria de impacto e ao indicador dessa categoria de impacto (PASSUELLO et al., 2014).

Além disso, é importante destacar que AICV possui diferentes métodos matemáticos de avaliação que também são conhecidos como modelos de caracterização. De acordo com (PIEKARSKI et al., 2012), esses modelos calculam os fatores de caracterização (ou fator de emissão, no caso do impacto do potencial de aquecimento global) que são multiplicados pelos dados do inventário que resulta num indicador referente a categoria de impacto definida.

Além disso, existem dois tipos de modelagens, a *midpoint* e *endpoint* (Figura 8). A *midpoint* tem como definição agregar todas as substâncias verificadas na ICV em categorias de impacto que representem uma comum característica do processo que afeta o meio ambiente (CAVALETT et al., 2013). Já a modelagem *endpoint* caracteriza o dano referente a categoria de impacto verificada no *midpoint*, fazendo-se necessário calcular todas as categorias de impacto resultantes verificadas a partir da ICV (CAVALETT et al., 2013).

Figura 8 – Esquema das informações obtidas nos métodos de avaliação



Fonte: Adaptado da Jolliet 2004

Alguns dos métodos de cálculo de AICV verificados na literatura são: CML 2002, Eco-indicator 99, Ecological Scarcity, EDIP, EPS 2000, Impact 2002+, LIME, LUCAS, MEEuP, ReCiPe, TRACI, USEtox e IMPACT World+, entre outros (JRC-IES, 2010). Os métodos podem variar de acordo com a abrangência geográfica, tipos de impactos analisados ou com o nível de avaliação de impacto - *midpoint* e/ou *endpoint*, além de outros aspectos. A título de exemplo, destaca-se as diferenças entre os métodos Eco-indicator 99, CML 2002, EPS 2000 e ReCiPe.

O método Eco-indicator 99 surgiu de uma política integrada do ministério holandês de Moradia, Planejamento Espacial e Ambiental, com escopo de aplicação global. O nível de avaliação de impacto é *endpoint* – saúde humana, qualidade do ecossistema e recursos, com o objetivo de tornar a interpretação dos resultados mais simples (MENDES; BUENO; OMETTO, 2015).

O CML 2002 teve sua origem também na Holanda em 2002, com nível de avaliação de impacto *midpoint* e uma lista de 1.500 modelos de caracterização definidos. A definição dos modelos foi realizada por meio de revisão de metodologias existentes em todo o mundo, o que contribui para que seu escopo seja de aplicação global (MENDES; BUENO; OMETTO, 2015).

Já a EPS 2000 (*Environmental Priority Strategies in product development*), desenvolvida na Suécia entre entes da academia e indústria, avalia os impactos *endpoint*, como saúde humana, capacidade de produção dos ecossistemas, recursos abióticos, biodiversidade e ações culturais e recreativas. Esse método busca apoiar desenvolvedores de produtos em suas decisões de conceito de produtos, logo os indicadores buscam contemplar esse objetivo (MENDES; BUENO; OMETTO, 2015).

O outro método destacado é o ReCiPe 2008, que é um seguimento dos métodos Eco-indicador 99 CML 2002, com abrangência de escopo global para o impacto de mudança climática, por exemplo (MENDES; BUENO; OMETTO, 2015). Neste método são combinadas as abordagens *midpoint* e *endpoint* para a avaliação de impacto do ciclo de vida, e que compatibiliza as modelagens e definições para direcionar os resultados em termos de impacto e danos (GOEDKOOPE et al., 2013). Para avaliações da construção civil, o método mais recomendável é o EN 15804 +A2 (MENEGATTI; CALDAS; TOLEDO, 2023).

Para esse estudo, destaca-se a categoria de impacto de mudanças climáticas, ou Potencial de Aquecimento Global (em inglês *Global Warming Potential – GWP*) definido no relatório de 2007 do IPCC, cujo o indicador é o CO₂ equivalente apresentado em detalhe na Tabela 4 abaixo.

Tabela 4 - Potencial de Aquecimento Global por composto

Composto	Fórmula Química	Potencial de Aquecimento Global			
		SAR ¹⁵ (100 anos)	20 anos	100 anos	500 anos
Dióxido de Carbono	CO ₂	1	1	1	1
Metano	CH ₄	21	72	25	7,6
Óxido nitroso	N ₂ O	310	289	298	153
HFC-23	CHF ₃	3.800	6.730	4.750	1.620
HFC-32	CH ₂ F ₂	8.100	11.000	10.900	5.200
HFC-41	CH ₃ F	-	10.800	14.400	16.400

Outros compostos são mencionados no relatório do IPCC da fonte de referência

Fonte: Adaptado de FORSTER et al. (2007)

1.2.2.4 Interpretação do ciclo de vida

A interpretação dos resultados é uma fase bastante crítica dentro da ACV devido a não definição de um método único para a avaliação pela NBR 14.040 (SANTOS et al., 2011). No entanto, essa mesma fase é extremamente importante para consolidar os resultados obtidos, explicitando as limitações, recomendações e demais questões relevantes sobre a ACV que possam contribuir com deliberações (PASSUELLO et al., 2014) de cunho projetual sobre a construção de edifícios com menor emissão incorporada de GEE, no caso deste estudo.

Com base no exposto, a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida pode ser realizada para certificar edifícios de baixa emissão de GEE incorporada (DIXIT et al., 2012; SHARRARD, 2007), pois possibilita considerar os impactos da construção do edifício em diversos estágios (PLANK, 2008; TING, 2006), assim permitindo a identificação de possíveis otimizações dos processos e produtos sob a perspectiva da adequação ambiental (SILVA, 2003).

1.3 Ferramentas de avaliação de emissões incorporadas em edifícios no contexto brasileiro

Para garantir que edifícios sejam mais sustentáveis ambientalmente, os produtos e sistemas que os compõem necessitam ter um melhor desempenho ambiental e que esse desempenho seja comunicado de forma transparente, permitindo que as partes interessadas tomem decisões mais bem embasadas (DURÃO et al., 2020). A maior parte dos bancos de dados disponibilizados possuem características das regiões onde foram estruturados, já outros

¹⁵ Referente ao relatório *Second Assessment Report - SAR* (1995) do IPCC

possuem uma abrangência internacional (CAMPOLINA; SIGRIST; MORIS, 2015), compilando informações de diversos países.

Logo, é de extrema importância que o setor da construção de edifícios brasileiro se aproprie de ferramentas que o apoie na descarbonização dos processos de produção e consumo vinculados a construção de edifícios (LÜTZKENDORF; BALOUKTSI, 2016; SILVA, 2003). Dessa maneira, este subcapítulo apresentará algumas ferramentas de apoio a realização da ACV para produtos, sistemas, materiais de construção e edifícios levantadas para o contexto brasileiro.

1.3.1 Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (SIDAC)

O SIDAC é uma ferramenta lançada em abril de 2022 a qual compila em sua primeira versão dados de emissão de CO₂ (expressa em kg) e consumo de energia (expresso em MJ) de alguns materiais utilizados na construção civil. A metodologia utilizada pela ferramenta é denominada Avaliação do Desempenho Ambiental da Construção (ADAC) - inicialmente denominada de “ACV Modular”, e se baseia na ACV. De acordo com (JOHN et al., 2020), esse método foi adaptado buscando simplificar etapas complexas do inventário da ACV definidas pela norma europeia EN 15.804 e incluindo impactos que são relevantes para o setor da construção civil, como escassez de minerais locais.

Essa ferramenta busca dirimir o desafio da carência de informações sobre materiais de construção no Brasil integrando os dados repassados pelas indústrias sobre seus processos. No entanto, atualmente o SIDAC, que está em sua primeira versão, possui poucos materiais cadastrados, faltando informações sobre materiais muito utilizados na construção brasileira como vidro, revestimento cerâmico, alumínio e outros¹⁶.

Dessa maneira, apesar da ferramenta ser de grande relevância na transição da descarbonização da indústria da construção devido, principalmente, pela simplificação da análise de impacto dos materiais – focando nos impactos mais relevantes para o setor da construção civil e viabilização de *benchmarking* setorial, para que o setor se aproprie exclusivamente da ferramenta é necessária a ampliação do banco de materiais nacionais

¹⁶ Informação verificada no acervo técnico da ferramenta disponível no site: https://sidac.org.br/conteudo_tecnico

disponibilizado. Portanto, nesta pesquisa realizou-se uma avaliação comparativa com outros bancos de inventários para verificar a maturidade da plataforma para o uso nacional.

1.3.2 Declaração Ambiental de Produto (DAPs)

As Declarações Ambientais de Produtos (DAPs) (em inglês *Environmental Product Declaration* – EPD) são documentos que apresentam informações referente aos impactos ambientais de produtos, como os materiais da construção (CALDAS; CARVALHO; TOLEDO FILHO, 2020). A base metodológica utilizada nas DAPs advém da ACV que busca compartilhar informações referentes ao desempenho ambiental do produto avaliado à sociedade (DURÃO et al., 2020). Além disso, as DAPs são reconhecidas internacionalmente por meio da norma europeia EN 15.804, como uma ferramenta para avaliação de impactos ambientais de materiais e sistemas componentes ou a ACV completa do produto (SECHER; COLLIN; LINNET, 2018).

A norma que apoia a elaboração de Rótulos e Declarações Ambientais no Brasil é a NBR 14.020 e as rotulagens ambientais são classificadas em três tipos, sendo elas: i. rotulagem I – selo verde; ii. rotulagem II – autodeclaração ambiental; e iii. rotulagem III – declaração ambiental de produto (DAP).

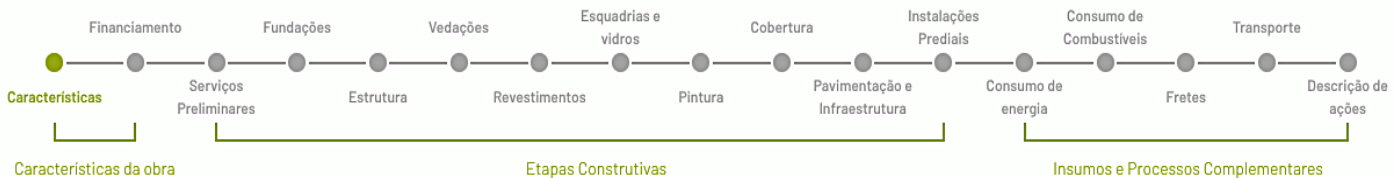
No Brasil a DAP (rotulagem III) é normatizada pela NBR 14.025 e teve seu primeiro programa instituído pela Portaria n.100/2016 sob responsabilidade do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) sendo um programa voluntário. Atualmente estão registradas 12 DAP de empresas brasileiras no *Internacional EPD System* registradas pela Fundação Vanzolini (TIMM; PASSUELLO, 2021), que é outro programa atuante no Brasil. De acordo com Kiss et al. (2018), o aumento dos registros teve como motivador o setor da construção civil, dando destaque a adoção de certificações LEED e AQUA-HQE.

Esta pesquisa utilizou DAPs levantadas para o contexto brasileiro elaboradas por indústrias nacionais que continham dados do potencial de aquecimento global referente a produção (A1-A3) de materiais da construção.

1.3.3 CECarbon¹⁷

A ferramenta desenvolvida em 2020, em parceria com o Governo Federal, sindicato da construção e cooperação internacional, permite calcular as emissões de GEE e o consumo energético advindos da etapa de construção de um edifício, como apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Fluxo do CeCarbon



Fonte: Site do CECarbon (2020) <https://www.cecarbon.com.br/simulation/feature>

A calculadora CECarbon tem como objetivo apoiar na gestão climática e energética da indústria da construção civil, padronizando a verificação dos impactos relacionados com as etapas de construção, operações e desmobilização do canteiro de obra. Uma das metas da ferramenta é mensurar indicadores de emissão de GEE e consumo energético com base nas informações obtidas pelo uso da plataforma de modo a engajar os atores da construção a serem mais sustentáveis.

De acordo com a metodologia da CeCarbon, o parâmetro do consumo energético trabalha com a avaliação de atividades de extração de materiais primas a atividades dentro do canteiro de obras, sendo considerada a energia incorporada nos materiais e uso de combustíveis em máquinas estacionárias e móveis. Para este indicador energético utiliza-se a unidade megajoule (MJ) e megawatt-hora (MWh) para compreender a eficiência energética da construção. Já o parâmetro de emissões considera o conjunto de GEE (CO₂, CH₄, N₂O, CFCs, PFCs, SF₆) que serão medidos em toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO₂e), métrica que apoia na identificação do impacto da edificação em relação as mudanças climáticas. Os fatores de emissão da ferramenta se baseiam na metodologia do GHG Protocol, onde os fatores são constantemente analisados e revisados pela consultoria ambiental do Sindicato da Construção de São Paulo (Sinduscon-SP). Além disso os dados de saída da ferramenta viabilizam a comparação dos resultados para diferentes edifícios.

¹⁷ Disponível em: <https://www.cecarbon.com.br/about>

Em resumo, a ferramenta consegue avaliar a emissão de GEE até as etapas A4 e A5 do ciclo de vida, e sendo ainda mais detalhada nas etapas mencionadas. Dessa forma, a sua utilização ainda se restringe a uma parte do ciclo de vida da edificação.

1.3.4 Ecoinvent

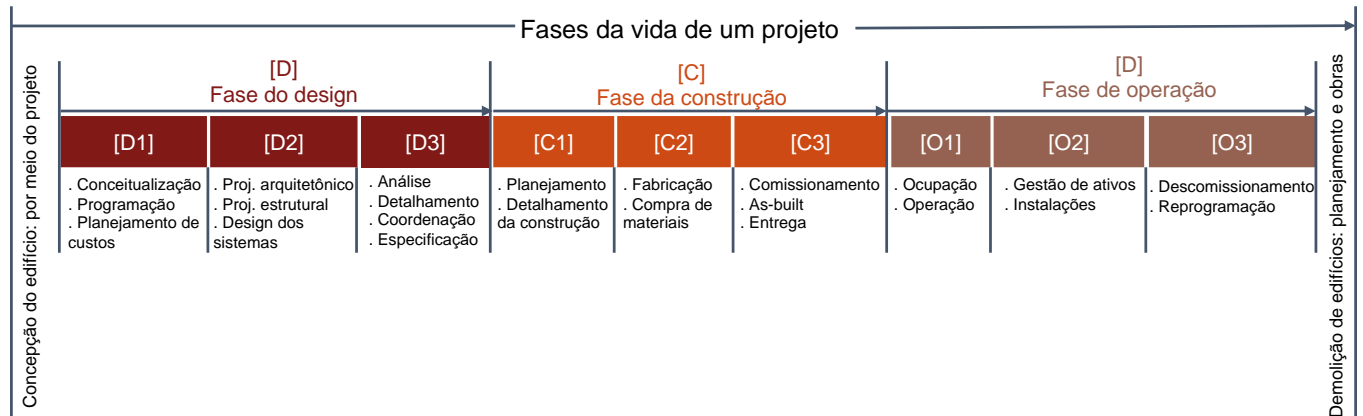
O Ecoinvent é uma ferramenta estruturada em 2003 pelo Instituto Federal Suíço para Pesquisas e Testes de Materiais (EMPA) em parceria com o governo suíço, que organiza banco de inventários de ciclo de vida. Os inventários contêm as informações de quantidade de produtos e sistemas, descreve as entradas e saídas de materiais, substâncias e energias de todas as etapas necessárias para a produção do produto ou sistema – extração, manufatura, transporte, disposição de resíduos, consumo de energia etc. (VINHAL, 2016). Além disso, a partir da versão 3.6, foram incluídos cerca de 3 mil materiais do Brasil.

A utilização deste banco de inventários proporciona uma avaliação eficiente e abrangente, pelo fato de ter um vasto banco de dados que inclui informações de materiais produzidos em países (ADAEI KHEZRI et al., 2021). Esta pesquisa fez uso de dados do potencial de aquecimento global extraídos do Ecoinvent para de materiais da construção do contexto brasileiro.

1.4 BIM e edifícios construídos

O *Building Information Modeling* (BIM) é uma tecnologia para facilitar a gestão de projetos de construção de edifícios e diferentes outros estágios, o qual permite unir diferentes temas necessários, de modo integrado, dentro do processo de trabalho (BRAILA; PANCHENKO; KANKHVA, 2021; SUCCAR, 2009). Dentre as diferentes possibilidades de uso do BIM, destaca-se a modelagem, extração e compartilhamento de informações com acurácia, como os quantitativos de materiais, seja na fase de projeto, como em edifícios já construídos (SANCHEZ LEITNER; SCHEER; DE PAULA LACERDA SANTOS, 2019), para apoiar na tomada de decisão em diferentes âmbitos (BRAILA; PANCHENKO; KANKHVA, 2021). As fases de vida de um projeto no BIM são divididas em fase de design, construção e operação (SUCCAR, 2009), como apresentado na Figura 10 abaixo:

Figura 10 - Fases de projeto BIM



Fonte: Adaptado de Succar (2009)

De acordo com Mascio e Wang (2013), o BIM é menos utilizado para estudos e trabalhos com edifícios já construídos em comparação com o uso para as fases de projeto, gestão e outros processos, porém pode, e deve, ser utilizado em qualquer fase de vida de um edifício (GÖKGÜR, 2015). Chen et al. (2018) também comenta, para além da questão sobre a pouca utilização do BIM em modelagens de edifícios construídos, há a questão dos dados estarem desatualizados para os modelos BIM existentes dos edifícios construídos. O BIM associado com a *Internet of Things* (IoT) busca promover um melhor desempenho e eficiência dos edifícios por meio de modelos de alta fidelidade que podem ser utilizados aplicados em diferentes contextos, principalmente em termos da sustentabilidade ambiental, em particular, para os edifícios construídos (ALTOHAMI et al., 2021). Logo, a utilização do BIM seja para primeira modelagem ou para atualização das existentes, como no caso do edifícios construídos, possui diferentes benefícios, destacando-se a documentação gerada de edifícios existentes por escaneamento a laser.

1.4.1 Escaneamento a laser

No caso de se trabalhar o tema de avaliação do impacto das mudanças climáticas advindas da construção do estoque de edifícios construídos, é interessante que se tenha acesso a informações das fases anteriores como de projeto e do canteiro de obras, o que nem sempre é possível. Portanto se faz necessário buscar alternativas para se levantar as informações sobre os edifícios construídos, como é o caso do escaneamento a laser (SKRZYPCZAK et al., 2022).

Dentre outras opções¹⁸, o escaneamento a laser é um método que apoia no levantamento de edifícios existentes para a elaboração de documentos *as-is* ou *as-found* (TANG et al., 2010; TANG; AKINCI, 2012; VOLK; STENGEL; SCHULTMANN, 2014). Os termos *as-is* ou *as-found* são utilizados quando se trata da captura de nuvens de pontos por escaneamento a laser, existem casos que se utilizam até mesmo o termo *as-is* BIM (ANIL et al., 2013).

O escaneamento a laser é uma solução mais popularizada em diferentes locais, destacando-se o escaneamento terrestre, vem ganhando espaço na indústria de arquitetura, engenharia e construção devido a sua agilidade em coletar de alta precisão tridimensionais de alta precisão (SKRZYPCZAK et al., 2022). Apesar do escaneamento a laser fornecer informações de qualidade sobre os edifícios levantados, ainda há a necessidade de realizar a avaliação in loco de especificações dos edifícios e materiais de construção (ALTOHAMI et al., 2021)

A utilização dessa tecnologia é uma tarefa complexa que exige planejamento para as etapas de levantamento, processamento e extração das informações, sendo este processo denominado *Scan-to-BIM*, com três etapas principais: o levantamento de dados com o equipamento adequado, o processamento realizado por softwares, onde são incluindo os diferentes arquivos contendo os pontos registrados no escaneamento e onde possa ser feita a filtragem de elementos desnecessários para a leitura da nuvem de pontos, e por fim a modelagem BIM a partir da nuvem de pontos (WANG et al., 2022). Alguns destaques do processo *Scan-to-BIM* estão apresentados na Figura 11 abaixo.

¹⁸ Fotogrametria, identificação por radiofrequência (RFID tag) e identificação por código e barras em edifícios novos. (VOLK; STENGEL; SCHULTMANN, 2014)

Figura 11 - Fluxo do Scan-to-BIM



Fonte: Adaptado de (SKRZYPCZAK et al., 2022; VALERO; BOSCHÉ; BUENO, 2022)

2 Material e Métodos

Observando o desafio de planejar edifícios alinhados com o compromisso de mitigação das mudanças climáticas nas cidades, este trabalho propõe a sistematização de um fluxo metodológico para avaliar a emissão incorporada de GEE em edifícios construídos, e como objeto de estudo, definiu-se a Etapa 01 do Setor Noroeste no Distrito Federal.

Dividiu-se metodologicamente a pesquisa em seis atividades principais, sendo elas: a definição da área de estudo, a definição das tipologias edilícias para a análise, o levantamento das características das tipologias, a extração e organização dos dados obtidos no levantamento, a verificação da emissão incorporada de GEE e análise dos resultados (Figura 12).

Figura 12 - Fluxo metodológico simplificado de pesquisa



Fonte: Autora, 2023

Optou-se por seguir a metodologia ACV que já é consolidada mundialmente, a partir da estrutura definida na NBR 14.040, e que se divide em quatro etapas principais apresentadas no Quadro 2, além de apresentar um resumo das ações a serem realizadas para completar cada etapa.

Quadro 2 - Resumo das etapas metodológicas da ACV

a. Definição do Escopo:	b. Análise do Inventário (ICV):	c. Avaliação do Impacto (AICV):	d. Interpretação:
i. Objetivo	i. Análise da subestrutura	i. Organização dos fatores de caracterização dos materiais;	i. Discutir resultados obtidos nas tipologias;
ii. Público-alvo	▪ Quantitativo e fundações	ii. Conversão para mesma unidade funcional;	ii. Comparar banco de dados;
iii. Metodologia	ii. Análise da Superestrutura		
iv. Estágios	▪ Quantitativo fachadas e cobertura		
v. Vida útil	(1.		
vi. Partes avaliadas			
vii. Base de dados			
viii. Software			

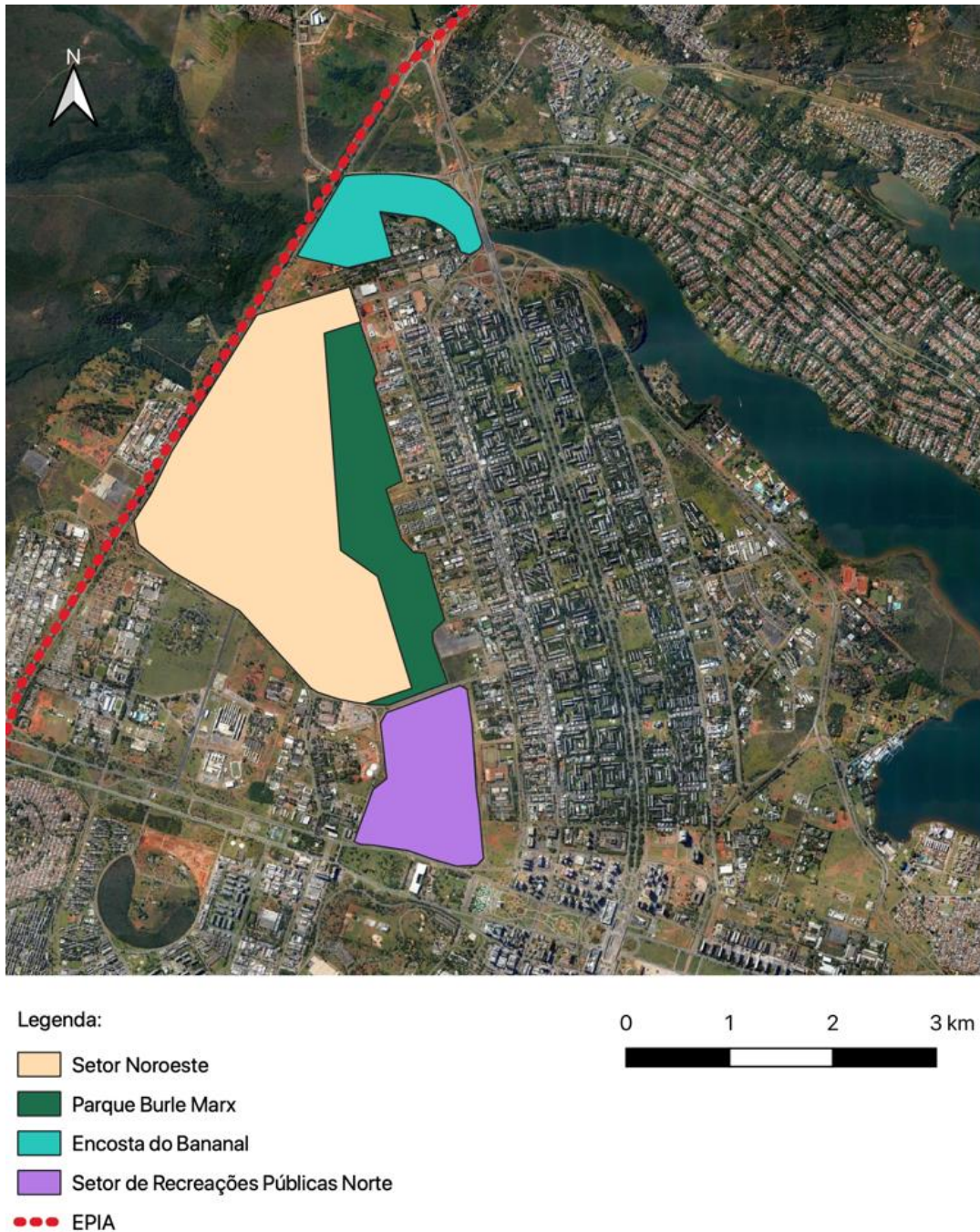
ix. Método x. Unidade funcional	escaneamento a laser; 2. Processamento; 3. Modelagem BIM) iii. Consolidação e conversão do quantitativo levantado dos materiais dos edifícios tipo.	iii. Verificação do kgCO2 eq./m2 das tipologias edilícias analisadas.	
Ferramentas: MIRO (fluxo)	Ferramentas: projetos de engenharia, as-is BIM	Banco de dados: ecoinvent, DAPs, literatura (contexto brasileiro) Método: EN 15804 +02 Method / EF 3.0 normalization and weighting set.	Ferramentas: Sidac

Fonte: Autora, 2023.

2.1 Objeto da pesquisa: Setor de Habitações Coletivas Noroeste (SHCNW)

Neste estudo, definiu-se o Setor de Habitações Coletivas Noroeste (SHCNW), também conhecido por Setor Noroeste, como objeto de avaliação do impacto as mudanças climáticas advindos da emissão incorporada dos edifícios construídos. O Setor se localiza próximo a via Estrada Parque Indústria e Abastecimento (EPIA), que integra todo o Distrito Federal e foi planejado para ser um bairro ecológico entre 1987 e 2008 e construído a partir de 2009. O Setor Noroeste faz parte da Região Administrativa de Brasília 1, que é composta pelo Setor Habitacional Noroeste, Parque Burle Marx, Setor de Recreações Públicas Norte e Encosta do Bananal, também sendo uma das áreas contempladas no plano do Brasília Revisitada (Figura 13).

Figura 13 - Localização do Setor Noroeste e entorno



Fonte: Autora, 2023 (QGIS versão 3.28)

O projeto urbano do Setor prevê a implantação de 20 superquadras residenciais, comércio local e equipamentos públicos, estimando uma população de 39.800 habitantes para uma área de 825 hectares (DE OLIVEIRA, 2016). A implementação do projeto se divide em duas etapas, sendo a 1ª contemplando as quadras de final 11 a 07 foi iniciada em 2009 e a 2ª fase contemplando as quadras 06 a 02, iniciada em 2013 (Figura 14).

Figura 14 - Etapa 01 do Setor Noroeste



Fonte: Autora, 2023

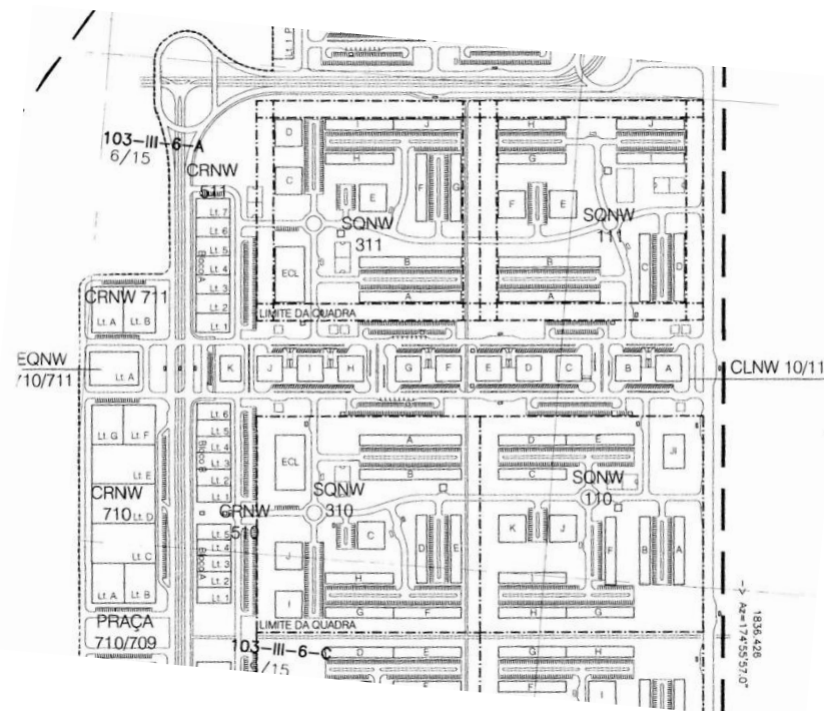
A Etapa 01, que está praticamente consolidada, tem em seu projeto urbanístico uma área para parcelamento futuro de aproximadamente 70,29 hectares (Figura 15); as Super Quadra Noroeste (SQNW) são compostas por 10 edifícios residenciais, praças e equipamentos coletivos; os Comércios Local Noroeste (CLNW) são compostos por 11 edifícios comerciais; e os Comércios Residenciais Noroeste (CRNW), divididos em quadras 700 e 500 e compostos por edifícios de uso misto e variam em quantidade e tamanhos dos lotes (Figura 16).

Figura 15 - Projeto urbanístico da Etapa 01 do Setor Noroeste



Fonte: Secretaria do Estado de Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente adaptado pela autora, 2023

Figura 16 - Composição da quadra do Projeto Urbanístico do Setor Noroeste



Fonte: Secretaria do Estado de Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente

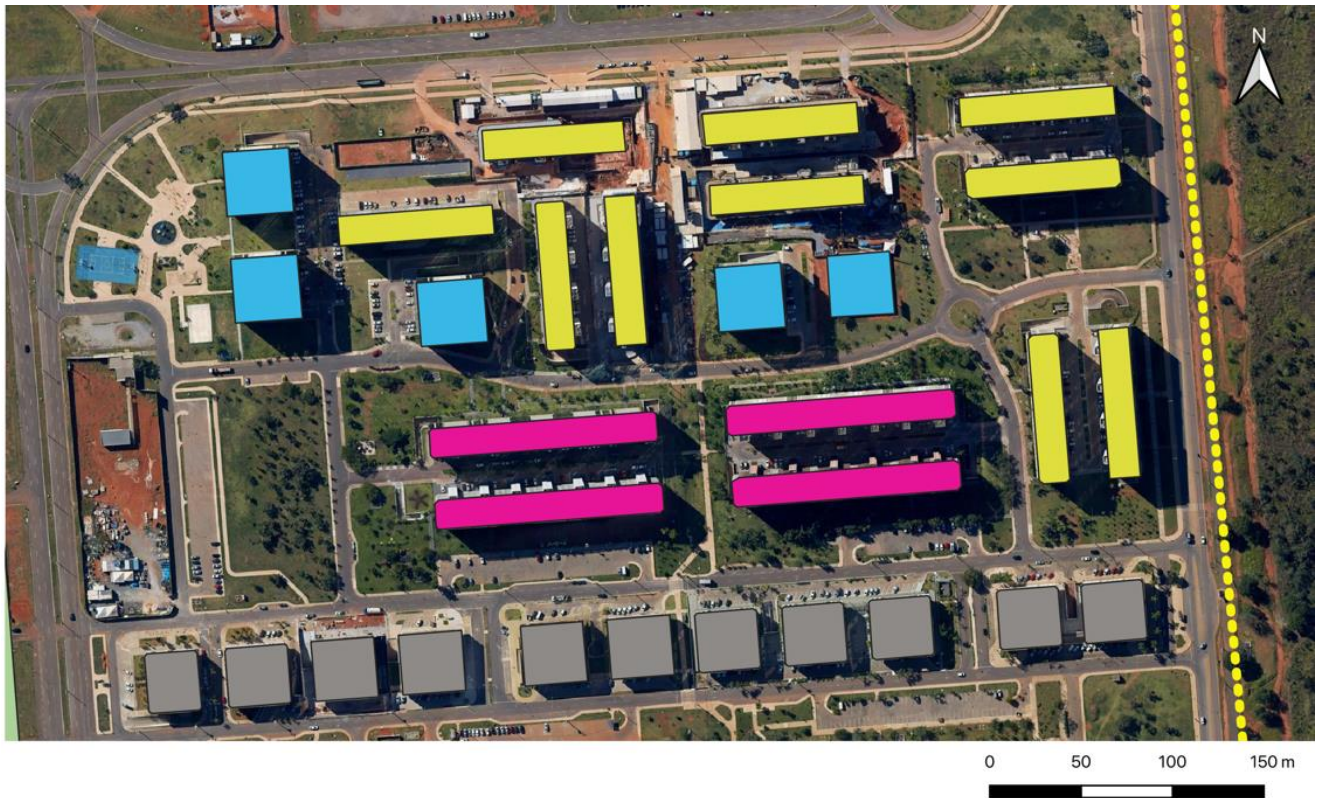
Até junho de 2022 foram construídas 84 edificações residenciais e 21 edificações comerciais construídas, sendo que no projeto é prevista a construção de 28 edifícios comerciais (CLNW) e 100 residenciais (SQNW). Como o observado no projeto, as edificações residenciais são a maioria no Setor, e os edifícios residenciais da etapa 01 se dividem em três tipos principais.

2.1.1 Tipologias edilícias residenciais do estudo





Analisando as edificações construídas localizada na Etapa 01, verificou-se três tipologias predominantes de edifícios residenciais vinculadas a metragem quadrada da projeção dos edifícios (Figura 17). Essas três tipologias identificadas, e detalhadas abaixo, servirão de base para a avaliação da emissão incorporada de GEE referente ao que já foi construído na Etapa 01 do Setor.

- Tipologia 01: planta quadrada com projeção de 1.024,00m² - 23 unidades
- Tipologia 02: planta retangular com projeção de 1.000,00m² - 51 unidades
- Tipologia 03: planta retangular com projeção de 1.500,00m² - 11 unidades

Figura 17 – Tipologias edilícias residenciais do Setor Noroeste



Legenda:

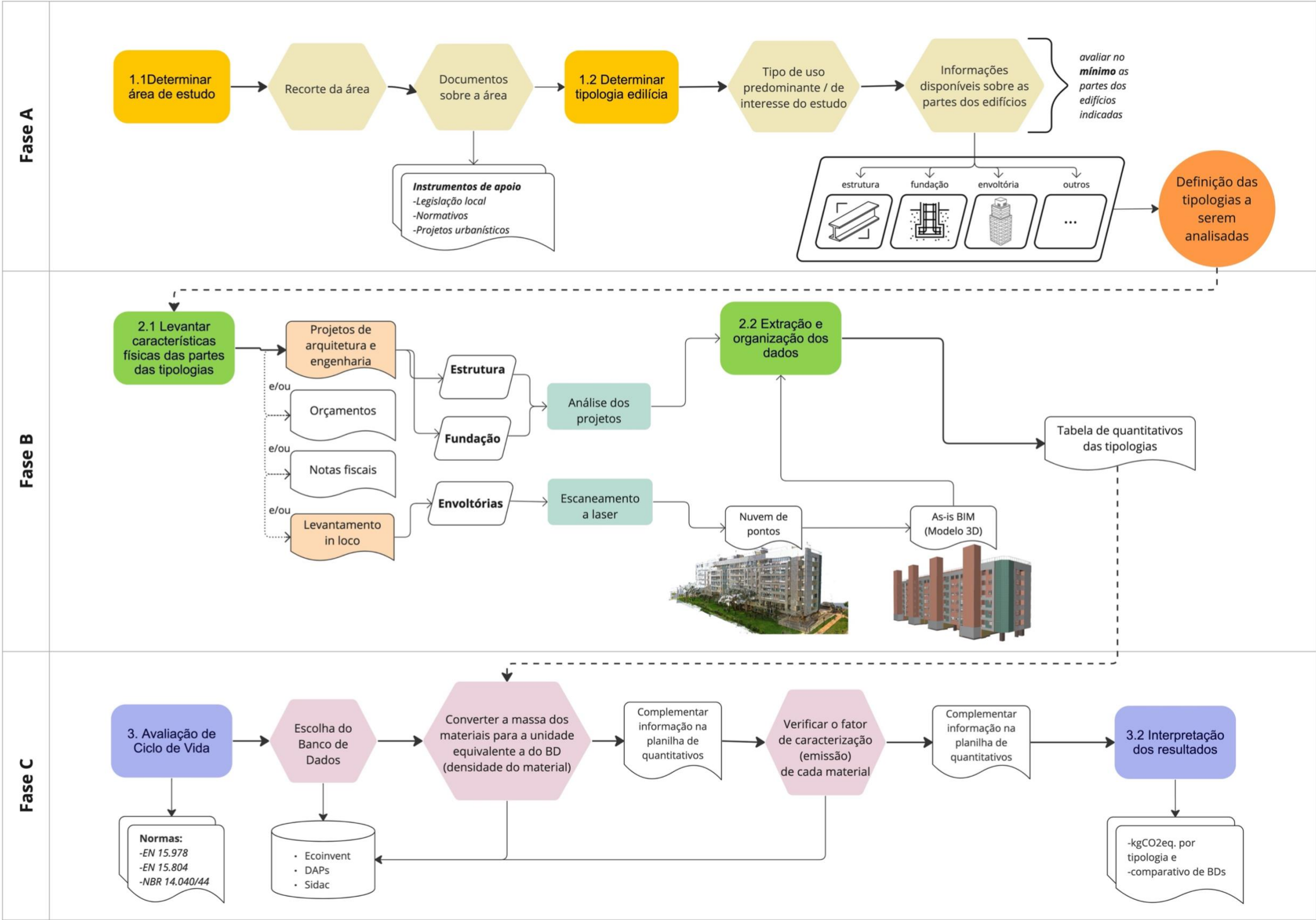
 Tipo 01 - quadrado 1.024m ² 32 x 32 metros 23 unidades	 Tipo 02 - retângulo 1.000m ² 12,5 x 80 metros 51 unidades	 Tipo 03 - retângulo 1.500m ² 12,5 x 120 metros 11 unidades	 Comércio
---	--	---	--

Fonte: Autora, 2023 (QGIS versão 3.28)

3 Resultados e Discussão

Os resultados obtidos para a sistematização de uma metodologia de avaliação da emissão incorporada de GEE dos edifícios residenciais do SHCNW da etapa 01 estão apresentados em três fases, sendo a primeira para definir as tipologias a serem analisadas, a segunda para extrair os dados quantitativos que serão avaliados de cada tipologia, por último realizar a ACV, como apresentado na sistematização do fluxo metodológico trabalhado neste estudo no Gráfico 6 abaixo.

Gráfico 6 - Sistematização do fluxo metodológico da ACV para edifícios construídos



Fonte: Autora, 2023

3.1 Definição do objetivo e escopo

O levantamento dos dados das edificações contribuiu com a definição e refinamento do escopo de análise da ACV. Os elementos físicos das tipologias levantadas foram: as estruturas e fundações (subestrutura) e envoltórias externas (superestrutura) – considerando os elementos das fachadas e coberturas como, paredes e seus componentes, aberturas e cobertura do terraço e ático.

Os demais elementos não foram considerados na ACV devido ao recorte da pesquisa e ao interesse em compreender a performance do escaneamento a laser no fluxo de avaliação de conjuntos edificados. O recorte da pesquisa também definiu a avaliação dos estágios de produção (A1-A3), que de acordo com Rasmussen et al. (2018) e Röck et al. (2020), é o estágio mais analisado para se compreender as emissões incorporadas de GEE.

Quadro 3 - Definições da ACV para o estudo

Informações para Avaliação do Ciclo de Vida	
Objetivo da avaliação	Calcular emissão incorporada de GEE dos edifícios construídos na Etapa 01 do SHCNW
Categoria de Impacto	Mudanças climáticas (ou Potencial de Aquecimento Global – PAG), com indicador kgCO ₂ eq.
Público – alvo	Pesquisadores, gestores e projetistas
Metodologia de avaliação	NBR 14.040, apoiada pela EN 15.978
Estágios da ACV	A1 - A3 (produção) - berço ao portão
Vida útil do edifício	50 anos (NBR 15.575)
Partes do edifício avaliadas	Estrutura, Fundação, Fachadas e Cobertura
Base de dados	Ecoinvent, DAP, Literatura
Software ACV	Microsoft Excel
Método de quantificação dos materiais	Avaliação dos projetos de estrutura e fundação; e visita de campo, escaneamento a laser com modelagem 3D
Unidade funcional	Área do edifício (m ²)

Fonte: Autora, 2023

3.2 Análise do inventário do ciclo de vida (ICV)

Nesta etapa foi realizado o levantamento de quantitativos sobre os elementos de subestrutura – estrutura e fundação, e superestrutura – fachadas e cobertura, detalhados nos itens abaixo.

3.2.1 Análise da Subestrutura

Foram analisadas as estruturas de 05 edifícios a partir do compartilhamento de informações de empresas de projetos estruturais. Dos 05 edifícios, 03 são retangulares de projeção 1.000m² e 02 quadrados de projeção 1.024m², sendo essa a amostra obtida para a verificação dos quantitativos e especificações dos materiais estruturais. Já para a fundação foram analisados 02 edifícios, a partir do compartilhamento de informações das empresas de projetos de fundação. Desse total, 01 edifício é de planta retangular com projeção de 1.000m² e outro quadrado de projeção de 1.024m². Observou-se, também, a predominância de concreto armado com pilares e vigas, com: concreto FCK 30 / 40 para estruturas e FCK maior ou igual a 20 para fundações, ambos utilizando armaduras CA50 e CA60.

Para cada edifício verificado, as informações foram repassadas por diferentes empresas, tanto para os projetos estruturais como para os de fundação, o que ocasionou na variação das representações dos projetos e o nível de detalhamento das informações, que neste caso gerou um grande desafio para a ponderação dos dados.

Outro ponto observado, foi a dificuldade no acesso às informações de projetos estruturais e de fundação para a tipologia 03, que é a tipologias de menor quantidade na etapa 01. Para sanar a falta de informação sobre essa tipologia, optou-se por escolher edifícios representativos das tipologias 01 e 02, e utilizar os valores desses representativos como base para estimar o quantitativo de materiais da tipologia 03.

3.2.2 Análise da Superestrutura

Para a análise dos materiais das envoltórias foi realizada visitas de campo para verificar os padrões construtivos dos edifícios construídos. Nas visitas foram verificados 33 edifícios utilizando o recurso fotográfico para registrar as envoltórias, que foram, posteriormente, organizadas de acordo com os materiais observados nas fachadas.

Como resultado desse registro, verificou-se a predominância dos seguintes materiais aplicados nas fachadas dos edifícios: vidro, pastilha cerâmica, pintura texturizada, granito, alumínio composto (ACM¹⁹), esquadrias de alumínio (Figura 18).

Figura 18 - Registros fotográficos da visita de campo



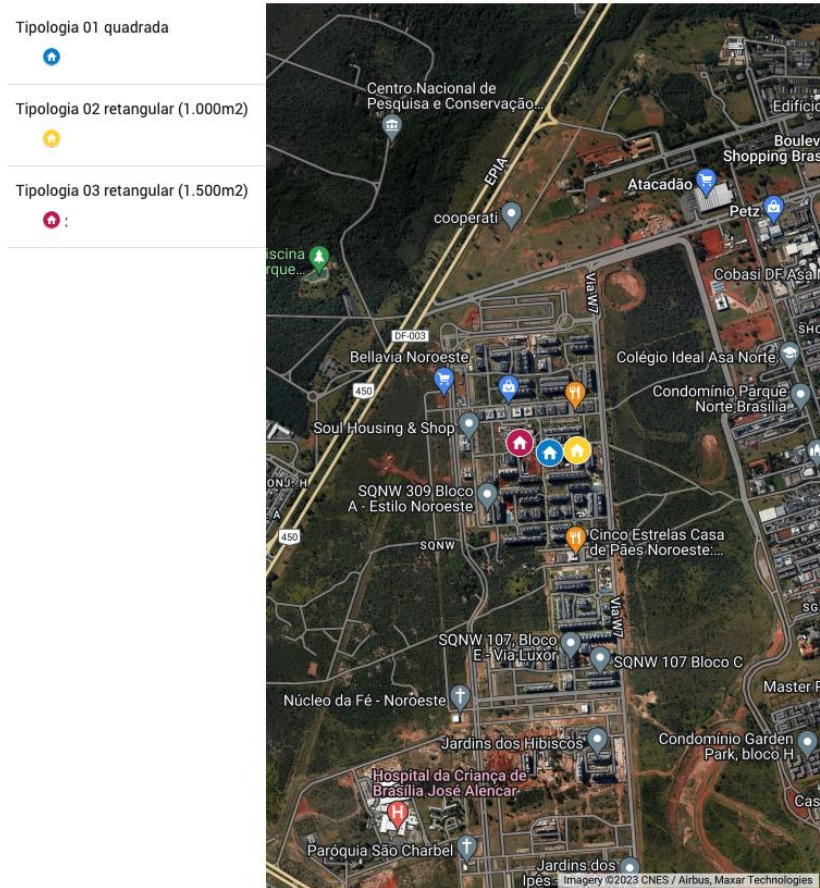
Fonte: Autora, 2023

Em seguida, foi feito um refinamento da avaliação dos materiais utilizados nas envoltórias dos edifícios por meio de consulta à empresa Quali-A – Soluções para edifícios mais sustentáveis, a qual trabalha com emissão de Etiqueta PBE-Edifica (Etiqueta Procel) em Brasília-DF. Nessa consulta, foram indicados alguns materiais que compõem a cobertura, que normalmente utiliza no piso: pré-moldado de concreto ou porcelanato, contra piso, manta geotêxtil, isolamento EPS e manta asfáltica; e para as fachadas, não somente reforçou-se o observado na visita de campo, mas como complementou as informações com especificações do tipo, espessura, fabricante e outros, dos materiais: vidro, revestimento cerâmico, revestimento em placa de ACM, granito incertado, pintura texturizada, esquadrias de alumínio, além de bloco de concreto e alvenaria e argamassa colante, como material de vedação das paredes.

¹⁹ Placas compostas por chapas de alumínio e polietileno.

Em síntese, a premissa utilizada para a escolha das tipologias a serem escanadas na etapa seguinte (AICV) do estudo baseou-se na análise das envoltórias, definindo as que possuem maior variedade dos materiais verificados e que sejam próximas umas as outras para diminuir o deslocamento dos sensores terrestres (Figura 19).

Figura 19 - Base para levantamento in loco das envoltórias



Fonte: Autora (Google My Maps), 2023

A partir da seleção dos edifícios, organizou-se o levantamento in loco com escaneamento a laser das fachadas dos edifícios com o equipamento Laser Scan da FARO modelo Focus^m (Figura 20). A coleta de dados feita pelo escâner terrestre a laser mede a distância do sensor, ou sensores, até as superfícies com resolução de milímetros a centímetros que mensuram milhares a centenas de milhares de pontos por segundo. Nesta etapa, o sensor é deslocado manualmente para vários pontos de coleta, logo o planejamento prévio do levantamento visando a diminuição do tempo de deslocamento é essencial para a eficiência do estudo (CHEN et al., 2018).

Figura 20 – Sensor terrestre no local do levantamento da tipologia 02



Fonte: Autora, 2023

O escaneamento de cada tipologia edilícia obteve diferentes números de varreduras e tempos devido ao tamanho de cada edifício e pelos obstáculos visuais encontrados, como vegetações, que estão detalhados na Tabela 5 abaixo:

Tabela 5 - Informações gerais do escaneamento a laser das tipologias

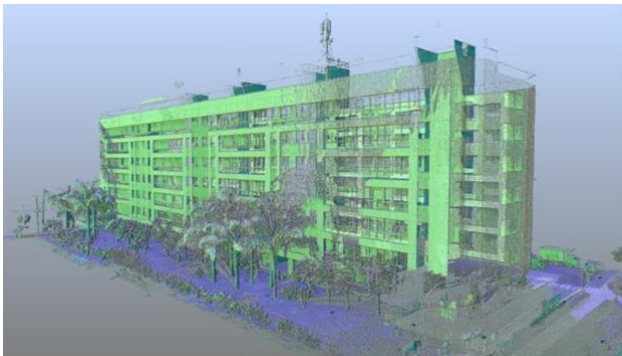
Tipologia	Número de varredura	Tempo	Imagem
1	23	1h10	
2	38	1h50	



Fonte: Autora, 2023

Para cada tipologia foi realizado o processamento das imagens que extraiu a partir dos diferentes arquivos obtidos nas varreduras, após uma etapa de filtragem de ruídos e alinhados numa coordenada global, um arquivo de nuvem de pontos (Figura 21). A nuvem de pontos é um modelo 3D composto por milhares de pontos que representam as superfícies de um edifício (CHEN et al., 2018).

Figura 21 - Etapas de processamento e geração da nuvem de pontos



Processamento



Nuvem de pontos

Fonte: Autora, 2023.

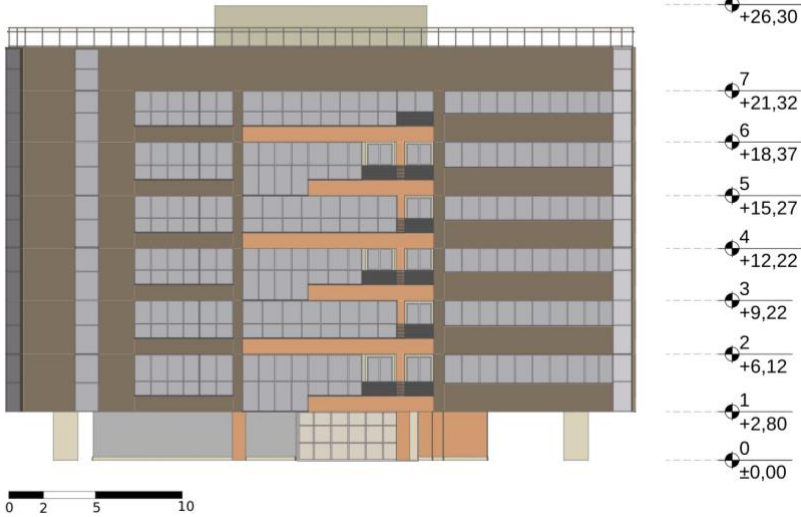
A partir da importação da nuvem de pontos e das informações coletadas sobre os materiais as partes analisadas dos edifícios, foi elaborado um modelo 3D em BIM, com o software Archicad. Por meio dos modelos BIM extraiu-se o quantitativo dos materiais, que são

apresentados no Apêndice 1 , para cada tipologia. Abaixo estão apresentadas as características físicas de cada tipologia verificada.

a. Tipologia 01

Tabela 6 - Características físicas da Tipologia 01

Característica	Informações
Área de projeção	1.024m ² (planta quadrada)
Área de piso	1.315,09m ²
Área total das fachadas	3.048m ²
Pavimentos	7 + pilotis (considerou-se área de 50% do piso)
Altura	30,28m
Área total	9.863,20m ²

	
<p>i. Nuvem de Pontos</p>	<p>ii. Modelagem 3D BIM</p>
 <p>The elevation drawing shows a cross-section of the building facade with floor levels marked on the right side. The levels are: 8 (+26,30), 7 (+21,32), 6 (+18,37), 5 (+15,27), 4 (+12,22), 3 (+9,22), 2 (+6,12), 1 (+2,80), 0 (±0,00). A scale bar at the bottom left indicates 0, 2, 5, and 10 units.</p>	
<p>iii. Elevação da fachadas 01, 02, 03 e 04 no modelo BIM</p>	

b. Tipologia 02

Tabela 7 - Características físicas da Tipologia 02

Características	Informação
Área de projeção	1.000m ² (planta retangular)
Área de piso	1.473,00m ²
Área total das fachadas	4.166m ²
Pavimentos	7 + pilotis (considerou-se área de 50% do piso)
Altura	29,24
Área total	11.047,50m ²

	
i. Nuvem de Pontos	ii. Modelagem 3D BIM
	
iii. Elevação de fachadas 02 e 04 no modelo BIM	



iv.Elevação de fachada 01 no modelo BIM



v.Elevação de fachada 03 no modelo BIM

c. Tipologia 03

Tabela 8 - Características físicas da Tipologia 03

Características	Informações
Área de projeção	1.500m ² (planta retangular)
Área de piso	2.109,90m ²
Área total das fachadas	6.162m ²
Pavimentos	7 + pilotis (considerou-se área de 50% do piso)
Altura	29,69m
Área total	15.824,25m ²

	
i.Nuvem de Pontos	ii.Modelagem 3D BIM
	
iii.Elevação da fachada 02 e 04 no modelo BIM	



iv. Elevação da fachada 01 no modelo BIM



v. Elevação da fachada 03 no modelo BIM

3.3 Avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV)

Para este estudo foi avaliado somente o impacto das mudanças climáticas, ou potencial de aquecimento global (PAG), (em inglês, *Global Warming Potential – GWP*-kg CO₂equivalente), utilizando o método EN 15804 +A2 Method V1.00 / EF 3.0 *normalization and weighting set*. Optou-se por realizar o cálculo da ACV em planilha no Microsoft Excel com apoio de dados obtidos nos bancos de inventários Ecoinvent 3.8, Declarações Ambientais de Produto (DAP) e literatura, focando em dados brasileiros. Os resultados obtidos para cada tipologia estão dispostos nas tabelas abaixo e as informações detalhadas sobre os fatores de caracterização e as fontes estão dispostas no **Apêndice 2**.

Tabela 9 - Tipologia 01: Potencial de Aquecimento Global (PAG)



Parte e Material de Construção	PAG (kgCO ₂ eq./m ²)	%
Cobertura		
Argamassa colante	4,05	42%
Bloco de concreto	2,07	21,5%
Contra piso	1,25	12,9%
Isolamento - manta geotextil	0,04	0,4%
Isolamento EPS	0,33	3,4%
Manta asfáltica	0,23	2,4%
Porcelanato	1,70	17,6%
Total da cobertura	9,65	0,7%
Fachadas		
Argamassa colante	0,29	0,8%
Bloco de concreto	13,47	39,9%
Granito	14,27	42,2%
Pastilha cerâmica	1,30	3,8%
Reboco	0,83	2,5%
Esquadria de alumínio	0,41	1,2%
Vidro	2,85	8,4%
Tinta	0,37	1,1
Total das fachadas	33,79	23,7%
Estrutura		
Concreto FCK 40 Mpa	55,45	67,3%
Aço	26,97	32,7%
Total da estrutura	82,42	57,9%
Fundação		
Concreto FCK ≥ 20 Mpa	10,49	63,4%
Aço	6,06	36,6%
Total da fundação	16,55	11,6%
Total da tipologia	142,41 kgCO₂eq./m²	
	2,84 kgCO₂eq./m².a	

Tabela 10 - Tipologia 02: Potencial de Aquecimento Global (PAG)



Parte e Material de Construção	PAG (kgCO ₂ eq./m ²)	% por parte
Cobertura		
Argamassa Colante	3,04	40,2%
Bloco de Alvenaria	0,96	12,7%
Concreto - Contra Piso	2,49	32,9%
Isolamento - Fibra Macia (geotextil)	0,03	0,4%
Isolamento EPS	0,33	4,3%
Manta asfáltica	0,03	0,5%
Porcelanato	0,68	9,0%
Total da cobertura	7,56	0,02%
Fachadas		
ACM	3,55	11,7%
Argamassa colante	0,29	0,9%
Bloco de Alvenaria	13,95	45,8%
Pastilha Cerâmica	1,34	4,4%
Granito	1,35	4,4%
Reboco	5,40	17,7%
Esquadria de alumínio	0,59	1,9%
Vidro	1,57	5,2%
Tinta	2,41	7,9%
Total das fachadas	30,45	11,5%
Estrutura		
Concreto FCK 40 Mpa	133,90	67,6%
Aço	64,13	32,4%
Total da estrutura	198,03	74,7%
Fundação		
Concreto FCK ≥ 20 Mpa	26,45	90,7%
Aço	2,72	9,3%
Total da fundação	29,18	11,0%
Total da tipologia	265,22 kgCO₂eq./m²	
	5,30 kgCO₂eq./m².a	

Tabela 11 - Tipologia 03: Potencial de Aquecimento Global



Parte e Material de Construção	PAG (kgCO ₂ eq./m ²)	% por parte
Cobertura		
Argamassa Colante	3,35	34,7%
Bloco de Concreto	1,53	15,8%
Contra Piso	2,79	29,0%
Isolamento – manta geotextil	0,08	0,8%
Isolamento EPS	0,46	4,8%
Manta asfáltica	0,48	5,0%
Porcelanato	0,95	9,9%
Total da cobertura	9,64	0,3%
Fachadas		
ACM	0,47	1,6%
Argamassa colante	0,30	1,0%
Pastilha cerâmica	1,20	4,0%
Porcelanato	0,11	0,4%
Granito	0,41	1,4%
Reboco	8,61	29,0%
Bloco de Concreto	12,23	41,3%
Esquadria de alumínio	0,72	2,4%
Vidro	2,46	8,3%
Tinta	3,13	10,5%
Total das fachadas	29,64	10,1%
Estrutura		
Concreto FCK 40 Mpa	149,38	67,6%
Aço	71,51	32,4%
Total da estrutura	220,89	75,5%
Fundação		
Concreto FCK ≥ 20 Mpa	29,50	90,7%
Aço	3,04	9,3%
Total da fundação	32,54	11,1%
Total da tipologia	292,71 kgCO₂eq./m²	
	5,85 kgCO₂eq./m².a	

Para todas as tipologias, a parte de maior emissão incorporada foi a estrutura, em seguida, para as tipologias 02 e 03, foram as fachadas e, para a tipologia 03, foi a fundação. A estrutura e a fundação são compostas por concreto FCK 30 / 40 Mpa e aço em todas as tipologias, já as fachadas são compostas por uma maior variedade de materiais, portanto optou-se por avaliar os elementos das fachadas com maior detalhe para compreender como os materiais influenciam na emissão incorporada desta parte dos edifícios

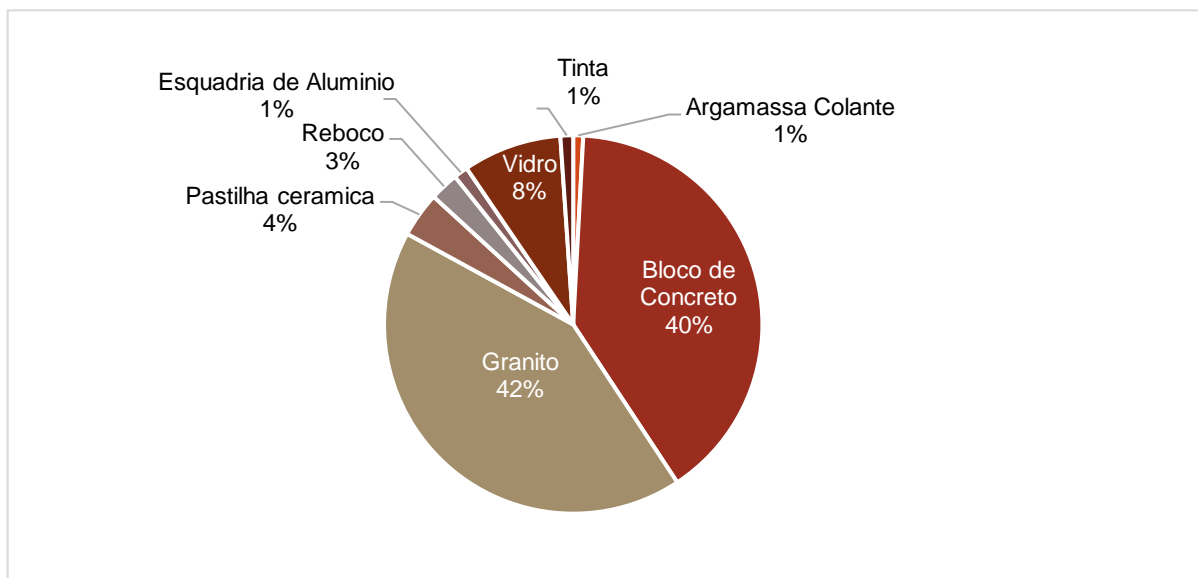
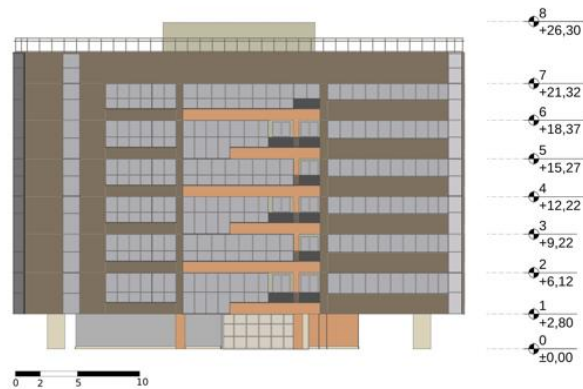
3.4 Interpretação

Para a interpretação dos resultados da ACV optou-se por realizar análises das fachadas e seus elementos e um comparativo entre os bancos de inventários trabalhados e o Sidac, plataforma nacional com dados da emissão de CO₂ do berço ao portão da fábrica.

3.4.1 Materiais das fachadas

Os materiais de maior PAG observados na tipologia 01 foram o granito, com 42%, o bloco de concreto, com 40% e o vidro, com 8%, sendo que o bloco de concreto é o material de vedação da parede.

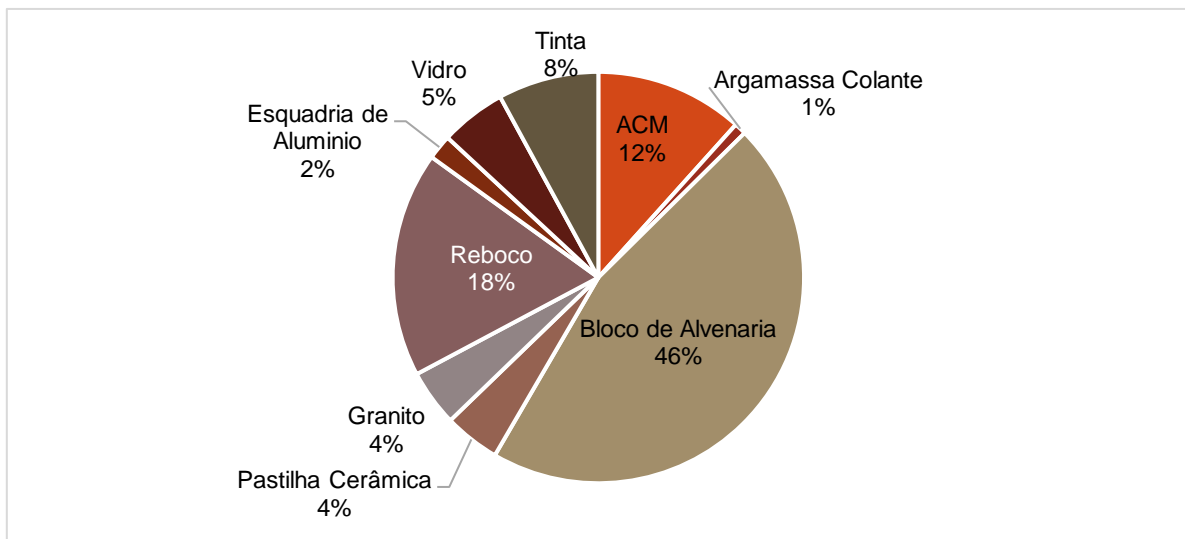
Gráfico 7 - Tipologia 01: Emissão incorporada pelos materiais das fachadas



Os materiais verificados nas fachadas da tipologia 02 estão dispostos no Gráfico 8, e observa-se o bloco de alvenaria como sendo o de maior PAG, com 46%, o reboco em

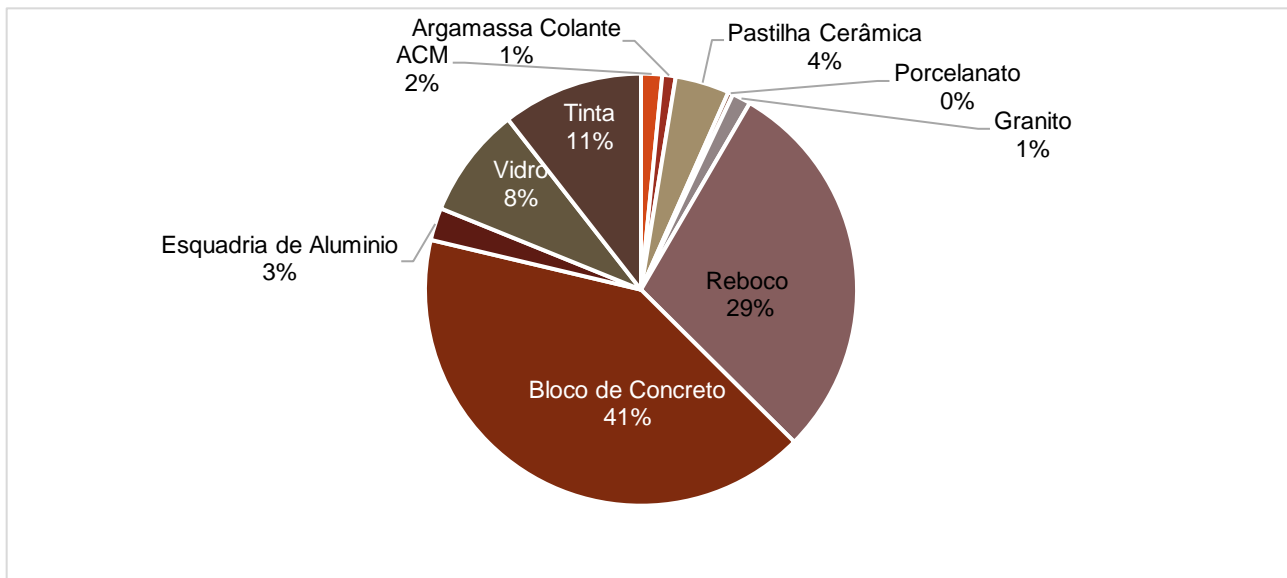
seguida, com 18% e revestimento ACM em terceiro, com 12%. Destaca-se que o bloco de alvenaria é o material de vedação da parede.

Gráfico 8 - Tipologia 02: Emissão incorporada pelos materiais das fachadas



Analisando as fachadas da tipologia 03 composição, observa-se que o material de maior PAG foi o bloco de concreto, com 41%, o reboco em seguida, com 29% e a tinta com 11%, sendo o bloco de concreto o material de vedação da parede.

Gráfico 9 - Tipologia 03: Emissão incorporada pelos materiais das fachadas



É importante ressaltar que o resultado da emissão incorporada de GEE (também identificado como potencial de aquecimento global - PAG) verificado especificamente nas fachadas, aponta que a tipologia 01, de menor PAG na totalidade do edifício, apresentou o maior PAG ao se analisar somente as fachadas; o PAG da tipologia 02 diminuiu analisando somente das fachadas; e a tipologia 03 teve o menor PAG ao analisar somente suas fachadas, como apresentado na Tabela 12 abaixo.

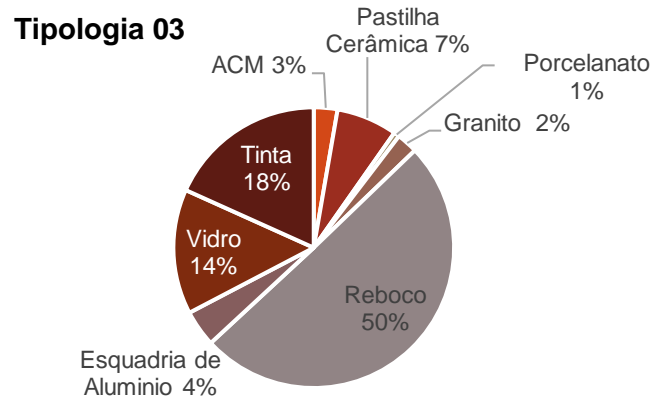
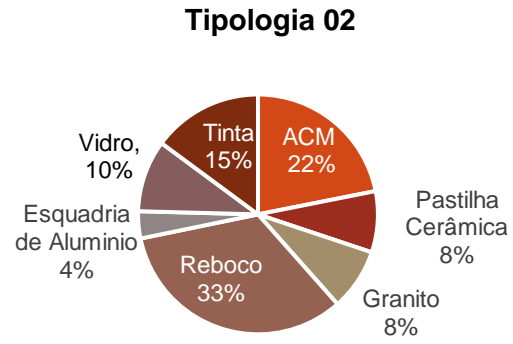
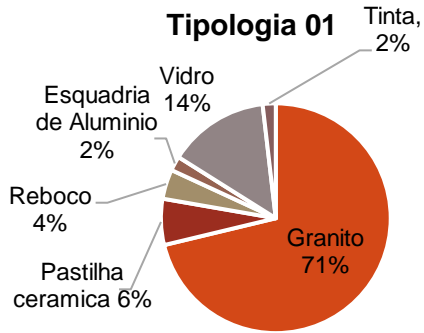
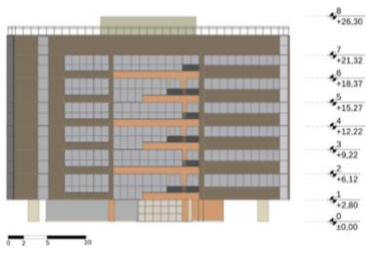
Tabela 12 - Potencial de aquecimento global por área de fachada

Edifício	Área total (m ²)	PAG Total (kgCO ₂ eq./m ²)	Área de fachada (m ²)	PAG da fachada (kgCO ₂ eq./m ² fachada)
Tipologia 01	9.863,20	142,41	3.048	109,35
Tipologia 02	11.047,50	265,22	4.166	80,76
Tipologia 03	15.824,25	292,71	6.162	76,11

3.4.2 Materiais de revestimento das fachadas

Discutindo-se apenas os materiais de revestimento das fachadas, ou seja, desconsiderando os materiais de vedação das paredes como bloco de concreto, de alvenaria e argamassa colante, temos que os materiais de revestimento, que são elementos mais facilmente alterados num projeto, mais impactantes observados na pesquisa foram: granito, reboco, ACM, vidro e tinta, como apresentados no Gráfico 10 abaixo:

Gráfico 10 - Materiais de revestimento de maior impacto nas tipologias



3.4.3 Comparativos entre diferentes bancos de inventários

Para comparar os valores do banco de inventário do Sidac foi considerado a média entre os valores mínimo e máximo da emissão de dióxido de carbono CO₂ (kg), considerado pela plataforma e que também é o GEE de maior impacto no aumento da temperatura terrestre. A plataforma utiliza como indicador o CO₂ por kg gerados na queima de combustíveis fósseis, reações químicas e queima ou decomposição de biomassa não renovável, atrelada ao desmatamento. Já os demais bancos de inventários, consideram o indicador de CO₂ equivalente, o qual contempla todos os gases de efeito estufa a partir de uma equivalência de valores. Logo, apesar dos bancos de inventários não apresentarem o mesmo indicador que o Sidac, a comparação entre eles ainda é válida, pois em ambos os casos o dióxido de carbono (CO₂) se mantém como o gás de maior impacto para as emissões de GEE resultantes.

Na tipologia 01, a comparação entre os bancos de inventários utilizados na pesquisa - DAPs, Ecoinvent e literatura, com a plataforma nacional Sidac, mostrou que apenas 07 materiais foram encontrados na plataforma brasileira, comparando com os 16 verificados na tipologia 01. Além disso, o resultado das emissões incorporadas na comparação dos bancos de inventários variou 18,84%. Com relação a tipologia 02, observou-se que o Sidac tinha apenas 07 materiais dos 17 verificados no edifício. O comparativo avaliado apresentou que a variação entre os bancos de inventários foi de 18,66% entre os resultados obtidos, sendo que o Sidac novamente apresentou um resultado menor que o verificado nos demais bancos de inventário. Os resultados da comparação entre os bancos de inventários verificados na tipologia 03 apontam que o Sidac também apresentou 07 materiais dos 17 analisados no edifício. Com relação as emissões incorporadas observadas, a variação entre os valores dos diferentes bancos de inventários foi de 20,31%, repetindo o fato do menor resultado ter sido verificado no Sidac. A Tabela 13 abaixo apresenta um resumo dos resultados obtidos na comparação dos bancos de inventários.

Tabela 13 - Comparativo entre banco de inventários nacionais

Tipologia 01		Tipologia 02		Tipologia 03	
DAP,Lit., Ecoinvent	SIDAC	DAP,Lit., Ecoinvent	SIDAC	DAP,Lit., Ecoinvent	SIDAC

142,41 kgCO ₂ eq/m ²	115,57 kgCO ₂ /m ²	265,22 kgCO ₂ eq/m ²	215,72 kgCO ₂ /m ²	292,71 kgCO ₂ eq/m ²	233,24 kgCO ₂ /m ²
2,85 kgCO ₂ eq/m ² .a	2,31 kgCO ₂ /m ² .a	5,30 kgCO ₂ eq/m ² .a	4,31 kgCO ₂ /m ² .a	5,85 kgCO ₂ eq/m ² .a	4,66 kgCO ₂ /m ² .a

3.4.4 Análise de Benchmarking

De acordo com o estudo de benchmarking SIA 2040, para que se atinja a meta global de redução das emissões de GEE até 2050 é necessário que edifícios residenciais, incluindo os impactos incorporados, operativos, limitem suas emissões em 11 kgCO₂eq/m²/ano por edifício, sendo 2 para operação e 9 para construção. Além disso, a média verificada no estudo de Röck et al. (2020), mostrou que edifícios novos padrões, ou seja, que seguem alguma norma para melhoria do desempenho, variam entre 2,06 e 8,46 kgCO₂eq/m².a, podendo ultrapassar 25 kgCO₂eq/m².a em casos extremos. Já o estudo de Frischknecht et al. (2020) apresentou o valor de 10 kgCO₂eq/m².a para o edifício residencial analisados apenas nas etapas de produção (A1-A3) para o contexto brasileiro.

Comparando os resultados obtidos nas três tipologias com o benchmarking verificado na literatura (142,41 kgCO₂eq/m² – 2,85 kgCO₂eq/m².a, 265,22 kgCO₂eq/m² – 5,30 kgCO₂eq/m².a e 292,71 kgCO₂eq/m² – 5,85 kgCO₂eq/m².a, respectivamente), observa-se que as tipologias do Setor Noroeste estão dentro do valor estimado para emissão incorporada, mas destaca-se que para este estudo só foram avaliadas as etapas de produção (A1-A3) e avaliando apenas as partes das estruturas, fundações e envoltórias dos edifícios, dando margem para o aumento das emissões por tipologia a depender do desempenho verificado nas fases a jusante e adicionando outras partes do edifício na análise.

4 Conclusões e Recomendações finais

A etapa 01 do Setor Noroeste registrou o potencial de aquecimento global (PAG) total de 400, 2kgCO₂eq./m².ano. Resultado obtido por meio da sistematização do fluxo metodológico de avaliação da emissão incorporada de GEE em edifícios construídos. Em parte do fluxo foi sugerido o uso de tecnologia BIM no levantamento das informações das características físicas dos edifícios realizada por escaneamento a laser, produção de nuvem de pontos e modelagem 3D, principalmente pela falta de informações sobre os projetos arquitetônicos. Para além do resultado do PAG total da etapa do setor, pôde-se concluir que a especificação dos materiais de revestimento das fachadas pode contribuir com a redução das emissões incorporadas nos edifícios. Neste tema, em particular, é sugerida que tal tomada de decisão dos projetos possa ser incluída nos instrumentos de planejamento e gestão das cidades, como planos climáticos, códigos de obras, planos diretores e outros, de modo a direcionar que os edifícios sejam projetados com menor PAG.

Para além do fato de não existir muitas informações disponíveis sobre o PAG relacionado ao estoque de edifícios construídos no Brasil, alguns outros entraves foram verificados na produção dessa informação, com a realização da ACV para edifícios construídos. Observou-se a carência de informações e dados acumulados sobre as fases anteriores a operação do edifício necessárias para melhor compreender os impactos ambientais acumulados na produção do edifício. Também se observou a dificuldade em acessar dados sobre todo o ciclo de vida das edificações, de modo a permitir uma compreensão holística do PAG de cada um. Além disso, destaca-se a falta de um banco de inventários único consolidado de fácil acesso contendo informações dos impactos ambientais, em especial ao CO₂eq., relacionados com a produção de materiais da construção para o contexto brasileiro.

Algumas oportunidades futuras foram verificadas, sendo elas relacionadas ao banco nacional de inventário, escaneamento a laser para levantamento de informações sobre edifícios construídos, ampliação de estudos ACV para edifícios no Brasil e o fomento do uso de materiais de menor PAG nas construções brasileiras como biomateriais e economia circular, que estão melhor detalhadas a seguir.

Atualmente, as ferramentas nacionais disponíveis para apoiar a metodologia ACV no Brasil ainda estão dispersas e em diferentes plataformas. A ferramenta de destaque identificada foi a calculadora SIDAC, que apesar de ainda não obter grande parte dos materiais utilizados

na construção de edifícios no Brasil, como vidro, pastilha cerâmica, granito, alumínio e outros, é uma referência em potencial assim que ampliado o seu banco de dados pelo fato desses dados serem extraídos diretamente da indústria brasileira. Esse instrumento consolidado apoiará no fortalecimento do mercado da construção civil mais alinhado com a meta de redução das emissões de GEE.

Outra oportunidade de estudo com relação ao escaneamento a laser de edifícios, em específico para edifícios já construídos e sem acesso aos projetos estruturais originais, seria ampliar estudos que viabilizem a identificação das estruturas e instalações dos edifícios de modo automático (por meio de algoritmos) que consigam reconstruir esses componentes, e que atualmente passam por limitações tecnológicas que diminuem a eficiência da coleta de dados, a acurácia dos resultados e o fato dos métodos não serem totalmente automatizados.

A partir dos resultados dessa pesquisa percebeu-se a dificuldade de acesso aos dados de todas as partes do edifício e de diferentes fases do ciclo de vida para se avaliar a emissão incorporada e operativa de GEE completa de um edifício no Brasil. Porém, reitera-se a importância de uma compreensão holística do PAG na avaliação de todo o ciclo de vida de um edifício. E, deve-se, quando possível, contabilizar todos os componentes relacionados ao projeto durante todas as etapas de vida. Também, deve-se avaliar as demais fases, para além da de produção (A1-A3), como a de construção (A4-A5), a de uso e operação (B4-B7) e de fim de vida (C1-C4). Portanto, é imprescindível que haja mais equipes integradas e engajadas em realizar estudos completos da ACV em edifícios para que possa se ampliar a existência de dados de edifícios, mais próximos a realidade praticada no país, apoiando na construção de cidades de menor impacto relacionados com às mudanças climáticas.

A implementação em larga escala de materiais de baixo carbono é um desafio presente em diferentes países. Os biomateriais, um forte exemplo de materiais de baixo carbono, por exemplo, necessitam de mais estudos fundamentados no Brasil e haja normas e incentivos que possam apoiar na ampliação da incorporação de biomateriais nas construções, seja em sua totalidade, ou como componente de materiais tradicionais como concreto, buscando diminuir a pegada de carbono de materiais muito utilizados e de alto PAG. Outro ponto de apoio a discussão sobre redução do PAG dos materiais de construção é a incorporação do conceito de economia circular no planejamento das construções, permitindo a reutilização de partes dos edifícios em outros contextos, reduzindo assim os resíduos advindos da demolição das construções.

Referências

ABEYDEERA, L. H. U. W.; MESTHRIGE, J. W.; SAMARASINGHALAGE, T. I. Perception of embodied carbon mitigation strategies: The case of Sri Lankan construction industry. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 11, 1 jun. 2019.

ADAEI KHEZRI, M. et al. Life Cycle Assessment of Residential Buildings Construction (Case Study: Tehran). **Environmental Energy and Economic Research**, v. 5, n. 1, p. 1–12, 2021.

ALBERTI, M.; HUTYRA, L. **Detecting carbon signatures of development patterns across a gradient of urbanization: linking observations, models, and scenarios**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/228428698>>.

ALTOHAMI, A. B. A. et al. Investigating approaches of integrating BIM, IoT, and facility management for renovating existing buildings: A review. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 7, 1 abr. 2021.

ANDERSON, J.; THORNBACK, J. **A guide to understanding the embodied impacts of construction products**. [s.l: s.n.].

ANIL, E. B. et al. Deviation analysis method for the assessment of the quality of the as-is Building Information Models generated from point cloud data. **Automation in Construction**, v. 35, p. 507–516, 2013.

ARMSTRONG, G.; WILKINSON, S.; CILLIERS, E. J. A framework for sustainable adaptive reuse: understanding vacancy and underuse in existing urban buildings. **Frontiers in Sustainable Cities**, v. 5, 2023.

BAI, X. et al. Six research priorities for cities. **Nature**, v. 555, p. 23–25, 2018.

BALOUKTSI, M.; LÜTZKENDORF, T.; KREINER, H. Guidance to including Embodied Energy & Embodied GHG Emissions in the decision-making process for SME's - Guideline for Construction Product Manufacturers (IEA EBC Annex 57). 2016.

BIRGISDÓTTIR, H. et al. **Evaluation of Embodied Energy and CO₂eq for Building Construction (Annex 57) - Subtask 4: Case studies and recommendations for the**

reduction of embodied energy and embodied greenhouse gas emissions from buildings. [s.l: s.n.].

BIROL, F. IEA World Energy Outlook Report. **IEA Annual Report**, v. 51, n. 6, p. 4847–4862, 2010.

BRAGA, R. Mudanças climáticas e planejamento urbano: uma análise do Estatuto da Cidade. **VI Encontro Nacional Anppas**, p. 1–15, 2012.

BRAILA, N.; PANCHENKO, N.; KANKHVA, V. **Building Information Modeling for existing sustainable buildings.** E3S Web of Conferences. **Anais...EDP Sciences**, 19 mar. 2021.

BRASIL. Plano Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC. **Comitê interministerial sobre mudança do clima**, p. 1–132, 2008.

BROER, R.; SIMJANOVIC, J.; TOTH, Z. **Implementing the Paris Agreement and Reducing Greenhouse Gas Emissions Throughout the Life Cycle of Buildings: European Public Policies, Tools and Market Initiatives.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/eficiencia-energetica/implementando-o-acordo-de-paris-atraves-de-edificacoes-de-baixa-intensidade-energetica.pdf/view>>.

CABEZA, L. F. et al. **Low carbon and low embodied energy materials in buildings: A review.** **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2013.

CALDAS, L.; CARVALHO, M.; TOLEDO FILHO, R. Inserção da ACV no processo de projeto de edificações: avaliação de alternativas e ferramentas computacionais para a prática de mercado. **Paranoá: cadernos de arquitetura e urbanismo**, n. 28, p. 0–1, 2020.

CALDAS, L. R. et al. Life cycle carbon emissions inventory of brick masonry and light steel framing houses in Brasília: proposal of design guidelines for low-carbon social housing. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 3, p. 71–85, 2017.

CAMPOLINA, J. M.; SIGRIST, C. S. L.; MORIS, V. A. DA S. Uma Revisão De Literatura Sobre Softwares Utilizados Em Estudos De Avaliação Do Ciclo De Vida. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, p. 735–750, 2015.

- CAUSONE, F.; TATTI, A.; ALONGI, A. From nearly zero energy to carbon-neutral: Case study of a hospitality building. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 11, n. 21, 2021.
- CAVALETT, O. et al. Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 3, p. 647–658, 2013.
- CHAGAS, V. B. P.; CHAFFE, P. L. B.; BLÖSCHL, G. Climate and land management accelerate the Brazilian water cycle. **Nature Communications**, v. 13, n. 1, 1 dez. 2022.
- CHANG-U, C.; SUNGHEE, K. **Evaluation of Embodied Energy and CO₂ eq for Building Construction (Annex 57) Subtask 2: A Literature Review**. [s.l.: s.n.].
- CHEN, M. et al. Proactive 2D model-based scan planning for existing buildings. **Automation in Construction**, v. 93, p. 165–177, 1 set. 2018.
- CONCEIÇÃO, G. C. A. **UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA ESCOLA POLITÉCNICA INVENTÁRIOS MUNICIPAIS DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE) NO BRASIL: Uma análise de sua prática, potencialidades e desafios**. [s.l.] Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, 2017.
- CRIPPA, M. et al. Global anthropogenic emissions in urban areas: Patterns, trends, and challenges. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 7, 2021.
- D'AMICO, B.; POMPONI, F.; HART, J. Global potential for material substitution in building construction: The case of cross laminated timber. **Journal of Cleaner Production**, v. 279, 10 jan. 2021.
- DE OLIVEIRA, M. E. **Ambiental No Setor Noroeste, Em Brasília**. 2016.
- DE WOLF, C.; POMPONI, F.; MONCASTER, A. Measuring embodied carbon dioxide equivalent of buildings: A review and critique of current industry practice. **Energy and Buildings**, v. 140, p. 68–80, 2017.
- DIXIT, M. K. et al. Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 8, p. 1238–1247, ago. 2010.

- DIXIT, M. K. et al. **Need for an embodied energy measurement protocol for buildings: A review paper. Renewable and Sustainable Energy Reviews**, ago. 2012.
- 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, n. May, p. 390–413, 2017.
- DODMAN, D. Blaming cities for climate change? An analysis of urban greenhouse gas emissions inventories. **Environment and Urbanization**, v. 21, n. 1, p. 185–201, 2009.
- DURÃO, V. et al. Assessment and communication of the environmental performance of construction products in Europe: Comparison between PEF and EN 15804 compliant EPD schemes. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 156, n. June 2019, p. 104703, 2020.
- EPE. BEN - Relatório Síntese 2023. 2023.
- ESPÍNDOLA, I. B.; RIBEIRO, W. C. Cidades e mudanças climáticas: desafios para os planos diretores municipais brasileiros. **Cadernos Metr pole**, v. 22, n. 48, p. 365–396, 2020.
- FORSTER, P. et al. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. Em: UNIVERSITY, C.; PRESS (Eds.). **Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: [s.n.]. v. 15p. 228–237.
- 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.
- GIORDANO, R. et al. **Embodied energy and operational energy assessment in the framework of nearly zero energy building and building energy rating**. Energy Procedia. **Anais...Elsevier Ltd**, 1 nov. 2015.
- GOEDKOOPE, M. J. et al. Category indicators at the midpoint and the endpoint level ReCiPe 2008. **ResearchGate**, n. June 2016, p. 126, 2013.
- GÖKGÜR, A. **Current and future use of BIM in renovation projects Ata Gök r**. [s.l: s.n.].

GRIGOLETTI, G. D. C. Caracterização de impactos ambientais de indústrias de cerâmica vermelha do estado do Rio Grande do Sul. **Dissertação De Mestrado**, p. 168, 2001.

GRIMM, N. B. et al. **Global change and the ecology of cities**. *Science*, 8 fev. 2008.

GUSTAVSSON, L.; JOELSSON, A.; SATHRE, R. Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight-storey wood-framed apartment building. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 2, p. 230–242, fev. 2010.

HÄKKINEN, T. et al. Reducing embodied carbon during the design process of buildings. **Journal of Building Engineering**, v. 4, p. 1–13, 2015.

HERNANDEZ, P.; KENNY, P. From net energy to zero energy buildings: Defining life cycle zero energy buildings (LC-ZEB). **Energy and Buildings**, v. 42, n. 6, p. 815–821, jun. 2010.

IBN-MOHAMMED, T. et al. Operational vs. embodied emissions in buildings - A review of current trends. **Energy and Buildings**, v. 66, p. 232–245, 2013a.

IBN-MOHAMMED, T. et al. Operational vs. embodied emissions in buildings - A review of current trends. **Energy and Buildings**, v. 66, p. 232–245, 2013b.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Evaluation of Embodied Energy and CO₂eq for Building Construction (Annex 57)**. [s.l: s.n.].

IPCC. Aquecimento Global de 1,5°C: Sumário para Formuladores de Políticas. **Ipcc**, p. 28, 2019.

IPCC. **Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Mitigation of Climate Change**. [s.l: s.n.].

Jl, C. et al. Embodied and Operational CO₂ Emissions of the Elementary School Buildings in Different Climate Zones. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 24, n. 4, p. 1037–1048, 1 abr. 2020.

JOHN, V. M. et al. Proposta de método prático para avaliar o desempenho ambiental no ciclo de vida da construção. **CONCRETO & Construções**, v. ,XLVIII, n. 100, p. 48–56, 2020.

KHAN, S. A. et al. Life Cycle Assessment of Embodied Carbon in Buildings: Background, Approaches and Advancements. **Buildings**, v. 12, n. 11, p. 1944, 2022.

KHASREEN, M. M.; BANFILL, P. F. G.; MENZIES, G. F. Life-cycle assessment and the environmental impact of buildings: A review. **Sustainability**, v. 1, n. 3, p. 674–701, 2009.

KISS, B. et al. Panorama de selos de sustentabilidade que demandam rotulagem tipo III no Brasil. **VI Congresso Brasileiro sobre Gestão do Ciclo de Vida**, n. June, p. 178–184, 2018.

LANDAUER, M.; JUHOLA, S.; KLEIN, J. The role of scale in integrating climate change adaptation and mitigation in cities. **Journal of Environmental Planning and Management**, v. 62, n. 5, p. 741–765, 16 abr. 2019.

LANGSTON, Y. L.; LANGSTON, C. A. Reliability of building embodied energy modelling: An analysis of 30 Melbourne case studies. **Construction Management and Economics**, v. 26, n. 2, p. 147–160, 2008.

LÜTZKENDORF, T.; BALOUKTSI, M. **Evaluation of Embodied Energy and CO₂eq for Building Construction (Annex 57) - Subtask 1: basics, actors and concepts**. [s.l.: s.n.].

MARTINS, F. DE S. C. E. F. DO A.; MELO, C. S. DE; ARAÚJO, D. 1º Inventário das Emissões de Gases de Efeito Estufa do Município de Rio Branco, Acre: Série 2012–2016. p. 40, 2019.

MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A. R. Life Cycle Impact Assessment: A review of the main methods. **Producao**, v. 26, n. 1, p. 160–175, 1 jan. 2015.

MENEGATTI, L.; CALDAS, L.; TOLEDO, R. PROJETAR PARA DESMONTAR: REVISÃO SOBRE A AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DE ESTRUTURAS DE CONCRETO. p. 157–170, 2023.

MISTRETTA, M. et al. **Evaluation of Embodied Energy and CO₂ equivalent for Building Construction (Annex 57) - Guideline for Policy Makers**. [s.l.: s.n.].

MORAGA, G. L. **Universidade Federal do Rio Grande do Sul Avaliação do Ciclo de Vida e simulação termoenergética em unidade habitacional unifamiliar do Programa Minha Casa Minha Vida**. [s.l.: s.n.].

NAGEL, M. et al. Diversity in collaboration: Networks in urban climate change governance. **Urban Climate**, v. 29, 1 set. 2019.

OSMANI, M.; O'REILLY, A. Feasibility of zero carbon homes in England by 2016: A house builder's perspective. **Building and Environment**, v. 44, n. 9, p. 1917–1924, set. 2009.

PASSUELLO, A. C. B. et al. Aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida na análise de impactos ambientais de materiais de construção inovadores: estudo de caso da pegada de carbono de clínqueres alternativos. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 4, p. 7–20, 2014.

PETRONILO, R.; ALMEIDA, J. M.; SANTOS, K. C. **Guia metodológico para inventários de emissões de gases de efeito estufa na construção civil – Setor edificações**. [s.l: s.n.].

PIEKARSKI, C. M. et al. Métodos De Avaliação De Impactos Do Ciclo De Vida: Uma Discussão Para Adoção De Métodos Nas Especificidades Brasileiras. **Revista Gestão Industrial**, v. 8, n. 3, p. 222–240, 2012.

PLANK, R. The principles of sustainable construction. **IES Journal Part A: Civil and Structural Engineering**, v. 1, n. 4, p. 301–307, 2008.

POMPONI, F.; MONCASTER, A. Embodied carbon mitigation and reduction in the built environment – What does the evidence say? **Journal of Environmental Management**, v. 181, p. 687–700, 2016.

RASMUSSEN, F. N. et al. Analysing methodological choices in calculations of embodied energy and GHG emissions from buildings. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 1487–1498, 1 jan. 2018.

RICS. **Methodology to calculate embodied carbon of materials**. [s.l: s.n.].

RICS. **Whole life carbon assessment for the built environment**. [s.l: s.n.].

RÖCK, M. et al. Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation. **Applied Energy**, v. 258, n. October 2019, p. 114107, 2020a.

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

RUSSELL-SMITH, S. V.; LEPECH, M. D. Cradle-to-gate sustainable target value design: Integrating life cycle assessment and construction management for buildings. **Journal of Cleaner Production**, v. 100, p. 107–115, 2015.

RUUSKA, A. P.; HÄKKINEN, T. M. The significance of various factors for GHG emissions of buildings. **International Journal of Sustainable Engineering**, v. 8, n. 4–5, p. 317–330, 2015.

SANCHEZ LEITNER, D.; SCHEER, S.; DE PAULA LACERDA SANTOS, A. O USO DO BIM PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS EDIFÍCIOS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA. v. 14, n. 2, p. 17–33, 2019.

SANTOS, M. F. N. et al. Importância da avaliação do ciclo de vida na análise de produtos: possíveis aplicações na construção civil. **Gestão da Produção, Operações e Sistemas (GEPROS)**, v. 2, p. 57–73, 2011.

SECHER, A. Q.; COLLIN, C.; LINNET, A. Construction Product Declarations and Sustainable Development Goals for Small and Medium Construction Enterprises. **Procedia CIRP**, v. 69, n. May, p. 54–58, 2018.

SHARRARD, A. L. Greening Construction Processes Using an Input-Output-Based Hybrid Life Cycle Assessment Model. n. April, p. 343, 2007.

SILVA, V. G. DA. **Avaliação da Sustentabilidade de Edifícios de Escritórios Brasileiros: diretrizes e base metodológica**. [s.l.] Escola Politécnica da Universidade de São Paulo., 2003.

SIMONEN, K. et al. **Life Cycle Assessment of Buildings: A Practice Guide**. The Carbon Leadership Forum, , 2019. Disponível em: <<http://carbonleadershipforum.org/projects/lca-practice-guide/>>

SKRZYPCZAK, I. et al. Scan-to-BIM method in construction: assessment of the 3D buildings model accuracy in terms inventory measurements. **Building Research and Information**, v. 50, n. 8, p. 859–880, 2022.

STOYKE, G. of a Zero Carbon Building for CO₂e, Energy, and Cost Using Stochastic Controls for an Energy System Integrating a Heat Pump, Solar Air Wall, PV, and a Smart Grid 2018.

SUCCAR, B. Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. **Automation in Construction**, v. 18, n. 3, p. 357–375, maio 2009.

TANG, P. et al. **Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques**. **Automation in Construction** Elsevier B.V., , 2010.

TANG, P.; AKINCI, B. **Automatic execution of workflows on laser-scanned data for extracting bridge surveying goals**. *Advanced Engineering Informatics*. **Anais...out**. 2012.

TIMM, J. F. G.; PASSUELLO, A. C. B. Potencial de uso de declaração ambiental de produto para auxiliar em compras públicas verdes na construção civil. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 2, p. 263–276, 2021.

TING, S. K. **OPTIMISATION OF EMBODIED ENERGY IN DOMESTIC CONSTRUCTION**. [s.l: s.n.].

UKGBC. Net Zero Carbon Buildings: A Framework Definition. **Advancing Net Zero**, n. April, 2019.

UNEP. Common Carbon Metric for measuring Energy Use & reporting Greenhouse Gas Emissions from building operations. 2009.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector 2020 Global Status Report for Buildings and Construction**. Nairobi: [s.n.]. Disponível em: <www.iea.org>.

VALERO, E.; BOSCHÉ, F.; BUENO, M. LASER SCANNING FOR BIM. **Journal of Information Technology in Construction**, v. 27, p. 486–495, 2022.

VINHAL, L. D. **Estudo De Indicadores Ambientais De Blocos Cerâmicos Com Base em Avaliação Do Ciclo De Vida, Considerando O Contexto Brasileiro**. Universidade Federal de São Carlos, 2016.

VOLK, R.; STENGEL, J.; SCHULTMANN, F. **Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - Literature review and future needs. Automation in Construction**, mar. 2014.

WANG, Q. et al. How data quality affects model quality in scan-to-BIM: A case study of MEP scenes. **Automation in Construction**, v. 144, 1 dez. 2022.

Apêndices

Apêndice 1 Quantitativos dos materiais levantados nas tipologias

i. Tipologia 01

Parte e Material de Construção	Qtd.	Un.	Densidade	Un.	Massa (kg)
Cobertura					
Argamassa Colante	103,04	m3	1.900,00	kg/m3	195.776,00
Bloco de Concreto	132,74	m3	1.400,00	kg/m3	185.836,00
Contra Piso	38,77	m3	2.100,00	kg/m3	81.417,00
Isolamento – manta geotextil	8,00	m3	40,00	kg/m3	320,16
Isolamento EPS	24,51	m3	27,50	kg/m3	674,05
Manta asfáltica	8,24	m3	1.100,00	kg/m3	9.064,00
Porcelanato	61,28	m3	2.100,00	kg/m3	128.682,54
Fachadas					
Argamassa Colante	7,30	m3	1.900,00	kg/m3	13.879,00
Bloco de Concreto	565,38	m3	2.137,00	kg/m3	1.208.217,06
Granito	48,87	m3	3.000,00	kg/m3	146.610,00
Pastilha cerâmica	7,37	m3	2.000,00	kg/m3	14.733,60
Reboco	10,36	m3	1.700,00	kg/m3	35.037,00
Esquadria de alumínio	591,02	m2	0,81	kg/m2	478,73
Vidro	1.405,72	m2	20,00	kg/m2	ND
Tinta	512,60	m2	3,00	kg/m2	1.537,80
Estrutura					
Concreto FCK 30 / 40 Mpa	1.560,38	m3	2.400,00	kg/m3	ND
Aço	164.210,00	Kg	7.800,00	kg/m3	164.210,00
Fundação					
Concreto FCK ≥ 20 Mpa	425,51	m3	2.400,00	kg/m3	ND
Aço	36.900,25	Kg	7.800,00	kg/m3	36.900,25

ii. Tipologia 02

Parte e Material de Construção	Qtd.	Un.	Densidade	Un.	Massa (kg)
Cobertura					
Argamassa Colante	86,65	m3	1.900,00	kg/m3	164.632,91
Bloco de Alvenaria	50,60	m3	1.400,00	kg/m3	70.840,00
Contra Piso	86,65	m3	2.100,00	kg/m3	181.962,69
Isolamento – manta geotextil	6,93	m3	40,00	kg/m3	277,28
Isolamento EPS	27,75	m3	27,50	kg/m3	762,99
Manta asfáltica	1,38	m3	1.100,00	kg/m3	1.521,19
Porcelanato	27,75	m3	2.100,00	kg/m3	58.264,50

Fachadas					
ACM	1.468,54	m2	7,04	kg/m2	ND
Argamassa Colante	8,16	m3	1.900,00	kg/m3	15.504,00
Bloco de Alvenaria	733,71	m3	1.400,00	kg/m3	1.027.194,00
Pastilha Cerâmica	8,48	m3	2.000,00	kg/m3	16.969,40
Granito	5,19	m3	3.000,00	kg/m3	16.781,00
Reboco	75,34	m3	1.700,00	kg/m3	128.073,41
Esquadria de alumínio	959,73	m2	0,81	kg/m2	777,38
Vidro	869,34	m2	20,00	kg/m2	ND
Tinta	3.764,50	m2	3,00	kg/m2	11.293,50
Estrutura					
Concreto FCK 30 / 40 Mpa	4.220,75	m3	2.400,00	kg/m3	ND
Aço	437.311,00	Kg	7.800,00	kg/m3	437.311,00
Fundação					
Concreto FCK ≥ 20 Mpa	1.202,14	m3	2.400,00	kg/m3	ND
Aço	18.576,98	Kg	7.800,00	kg/m3	18.576,98

iii. Tipologia 03

Parte e Material de Construção	Qtd.	Un.	Densidade	Un.	Massa (kg)
Cobertura					
Argamassa colante	139,37	m3	1.900,00	kg/m3	264.793,50
Bloco de concreto	156,91	m3	1.400,00	kg/m3	219.674,00
Contra Piso	139,37	m3	2.100,00	kg/m3	292.666,50
Isolamento - manta geotextil	27,87	m3	40,00	kg/m3	1.114,92
Isolamento EPS	55,75	m3	27,50	kg/m3	1.533,02
Manta asfáltica	27,87	m3	1.100,00	kg/m3	30.660,30
Porcelanato	55,75	m3	2.100,00	kg/m3	117.066,60
Fachadas					
ACM	276,65	m2	7,04	kg/m2	ND
Argamassa colante	12,40	m3	1.900,00	kg/m3	23.560,00
Pastilha cerâmica	17,35	m3	2.000,00	kg/m3	21.830,63
Porcelanato	6,43	m3	2.100,00	kg/m3	13.504,35
Granito	2,27	m3	3.000,00	kg/m3	7.339,99
Reboco	171,95	m3	1.700,00	kg/m3	292.315,00
Bloco de Concreto	1.099,65	m3	1.400,00	kg/m3	1.759.187,00
Esquadria de alumínio	1.671,24	m2	0,81	kg/m2	1.353,70
Vidro	1.950,04	m2	10,00	kg/m2	ND
Tinta	6.986,79	m2	3,00	kg/m2	20.960,37
Estrutura					
Concreto FCK 30 / 40 Mpa	6744,85	m3	2.400,00	kg/m3	ND

Aço	698499,2	Kg	7.800,00	kg/m3	698.499,20
Fundação					
Concreto FCK≥ 20 Mpa	1920,13	m3	2.400,00	kg/m3	ND
Aço	29672,25	Kg	7.800,00	kg/m3	29.672,25

Apêndice 2 Fatores de caracterização e fontes dos materiais levantados

i. Tipologia 01

Parte e Material de Construção	Fator de Caracterização (ou emissão)	Un. Fun.	Fonte
Cobertura			
Argamassa colante	0,204	kg	DAP ²⁰
Bloco de concreto	0,11	kg	Freitas et al. (2023)
Contra piso	0,151	kg	DAP ²¹
Isolamento - manta geotextil	1,08	kg	Archicad ²²
Isolamento EPS	4,76	kg	Ecoinvent - Polystyrene foam slab {RoW} production Cut-off, U
Manta asfáltica	0,25	kg	Ecoinvent - Mastic asphalt {RoW} production Cut-off, U
Porcelanato	0,13	kg	Archicad
Fachadas			
Argamassa colante	0,204	m3	DAP
Bloco de concreto	0,11	kg	Freitas et al. (2023)
Granito	0,96	kg	Ecoinvent - Natural stone plate, polished {RoW} production Cut-off, U
Pastilha cerâmica	0,87	kg	Carcassi et al. (2022)
Reboco	0,47	kg	Ecoinvent - Clay plaster {RoW} production Cut-off, U
Esquadria de alumínio	8,43	kg	Carcassi et al. (2022)
Vidro	20,00	m2	DAP ²³
Tinta	2,36	m3	Moraga, G. (2017) - Ecoinvent
Estrutura			
Concreto FCK 40 Mpa	350,47	m3	Ecoinvent - Concrete, 40MPa {BR} concrete production, 40MPa, ready-mix, with cement limestone 6-10% Cut-off, U
Aço	1,62	kg	DAP ²⁴
Fundação			
Concreto FCK≥ 20 Mpa	243,1	m3	Ecoinvent - Concrete, 25MPa {BR} concrete production, 25MPa, ready-mix, with cement limestone 6-10% Cut-off, U
Aço	1,62	kg	DAP

²⁰ DAP - Votorantim unidade de Camaçari – Disponível em: <https://environdec.com/library/epd1121>

²¹ DAP – Votorantim unidade de Cajamar – Disponível em: <https://environdec.com/library/epd1122>

²² Neste caso não foram encontrados os inventários no ecoinvent, DAPs e literatura sobre o material em questão para o contexto brasileiro, portanto, optou-se por utilizar o valor default do carbono incorporado verificado no software Archicad.

²³ DAP – Cebrace – Disponível em: <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/c6f52434-8e43-46ec-cef5-08daa1eb7336/Data>

²⁴ DAP – ArcelorMittal Brasil – Disponível em: <https://redeacv.org.br/files/e86fa6f8d28d39e880a7f7f90595db6a.pdf>

ii. Tipologia 02

Parte e Material de Construção	Fator de Caracterização (ou emissão)	Un. Fun.	Fonte
Cobertura			
Argamassa Colante	0,204	kg	DAP
Bloco de Alvenaria	0,15	kg	Freitas et al. (2023)
Concreto - Contra Piso	0,151	kg	DAP
Isolamento - Fibra Macia (geotextil)	1,08	kg	Archicad
Isolamento EPS	4,76	kg	Ecoinvent - Polystyrene foam slab {RoW} production Cut-off, U
Manta asfáltica	0,25	kg	Ecoinvent - Mastic asphalt {RoW} production Cut-off, U
Porcelanato	0,13	kg	Archicad
Fachadas			
ACM	26,70	m2	DAP ²⁵
Argamassa colante	0,204	kg	DAP
Bloco de Alvenaria	0,15	kg	Freitas et al. (2023)
Pastilha Cerâmica	0,87	kg	Carcassi et al. (2022)
Granito	0,96	kg	Ecoinvent - Natural stone plate, polished {RoW} production Cut-off, U
Reboco	0,47	kg	Ecoinvent - Clay plaster {RoW} production Cut-off, U
Esquadria de alumínio	8,43	kg	Freitas et al. (2023)
Vidro	20,00	m2	DAP
Tinta	2,36	kg	Moraga (2017)
Estrutura			
Concreto FCK 40 Mpa	350,47	m3	Ecoinvent - Concrete, 40MPa {BR} concrete production, 40MPa, ready-mix, with cement limestone 6-10% Cut-off, U
Aço	1,62	kg	DAP
Fundação			
Concreto FCK ≥ 20 Mpa	243,10	m3	Ecoinvent - Concrete, 25MPa {BR} concrete production, 25MPa, ready-mix, with cement limestone 6-10% Cut-off, U
Aço	1,62	Kg	DAP

iii. Tipologia 03

Parte e Material de Construção	Fator de Caracterização (ou emissão)	Un. Fun.	Fonte
Cobertura			
Argamassa Colante	0,204	kg	DAP
Bloco de Concreto	0,11	kg	Freitas et al. (2023)
Contra Piso	0,151	kg	DAP
Isolamento – manta geotextil	1,08	kg	Archicad
Isolamento EPS	4,76	kg	Ecoinvent - Polystyrene foam slab {RoW} production Cut-off, U
Manta asfáltica	0,25	kg	Ecoinvent - Mastic asphalt {RoW} production Cut-off, U
Porcelanato	0,13	kg	Archicad

²⁵ DAP – Novelis – Disponível em: <https://european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2022/09/2021-11-26-epd1-anodised-sheet-novelis.pdf>

Fachadas			
ACM	26,70	m2	DAP
Argamassa colante	0,204	kg	DAP
Pastilha cerâmica	0,87	kg	Carcassi et al. (2022)
Porcelanato	0,13	kg	Archicad
Granito	0,96	kg	Ecoinvent - Natural stone plate, polished {RoW} production Cut-off, U
Reboco	0,47	kg	Ecoinvent - Clay plaster {RoW} production Cut-off, U
Bloco de Concreto	0,11	kg	Freitas et al. (2023)
Esquadria de alumínio	8,43	kg	Carcassi et al. (2022)
Vidro	20,00	m2	DAP
Tinta	2,36	kg	Moraga (2017)
Estrutura			
Concreto FCK 40 Mpa	350,47	m3	Ecoinvent - Concrete, 40MPa {BR} concrete production, 40MPa, ready-mix, with cement limestone 6-10% Cut-off, U
Aço	1,62	kg	DAP
Fundação			
Concreto FCK≥ 20 Mpa	243,10	m3	Ecoinvent - Concrete, 25MPa {BR} concrete production, 25MPa, ready-mix, with cement limestone 6-10% Cut-off, U
Aço	1,62	kg	DAP

Apêndice 3 Comparativo entre os bancos de inventários para o contexto brasileiro

i. Tipologia 01

Parte e Material de Construção	F. Carac.	PAG (kgCO ₂ eq)	Sidac CO ₂ (kg)	
Cobertura				
Argamassa Colante	0,204	39.938,30	384,60	39.629,18
Bloco de Concreto	0,11	20.441,96	0,55 (un)	10.873,38
Contra Piso	0,151	12.293,97	226,15	8.767,84
Isolamento – manta geotextil	1,08	345,77	ND	345,77
Isolamento EPS	4,76	3.206,72	ND	3.206,72
Manta asfáltica	0,25	2.240,62	ND	2.240,62
Porcelanato	0,13	16.728,72	ND	16.728,72
TOTAL:		95.196,07	TOTAL:	81.792,24
Fachadas				
Argamassa Colante	0,204	2.829,48	384,60	2.807,58
Bloco de Concreto	0,11	132.903,88	0,55 (un)	87.290,66
Granito	0,96	140.745,60	ND	140.532,87
Pastilha cerâmica	0,87	12.818,23	ND	12.818,23
Reboco	0,47	8.210,71	315,00	3.263,40
Esquadria de Alumínio	8,43	4.035,66	ND	4.035,66
Vidro	20,00	28.114,40	ND	28.114,40
Tinta	2,36	3.629,21	ND	3.629,21
TOTAL:		333.287,17	TOTAL:	282.704,74
Estrutura				
Concreto FCK 40 Mpa	350,47	546.866,38	339,45	529.670,99
Aço	1,62	266.020,20	0,74	122.081,92
TOTAL:		812.886,58	TOTAL:	651.752,92
Fundação				
Concreto FCK ≥ 20 Mpa	243,1	103.441,48	226,15	96.229,09
Aço	1,62	59.778,41	0,74	27.433,49
TOTAL:		163.219,89	TOTAL:	123.662,58
DAP / Ecoinvent / Literatura:		1.404.589,70 kgCO₂eq	Sidac	1.139.912,47 kgCO₂/kg
		142,41 kgCO₂eq/m²		115,57 kgCO₂/m²
		2,85 kgCO₂eq/m².a		2,31 kgCO₂/m².a

ii. Tipologia 02

Parte e Material de Construção	F. Carac.	DAP/Ecoinvent/Lit. (kgCO ₂ eq)	Sidac CO ₂ (kg)	
Cobertura				
Argamassa Colante	0,204	33.585,11	384,60	33.325,17
Bloco de Alvenaria	0,15	10.626,00	0,44 (un)	7.602,34
Contra Piso	0,151	27.476,37	226,15	19.595,65
Isolamento – manta geotextil	1,08	299,46	ND	299,46
Isolamento EPS	4,76	3.631,82	ND	3.631,82
Manta asfáltica	0,25	380,30	ND	380,30
Porcelanato	0,13	7.516,12	ND	7.516,12
TOTAL:		83.515,18	TOTAL:	72.350,85
Fachadas				
ACM	26,70	39.210,02	ND	39.210,02
Argamassa Colante	0,20	3.162,82	384,60	3.135,53
Bloco de Alvenaria	0,15	154.079,10	0,44 (un)	120.863,26

Pastilha Cerâmica	0,87	14.763,38	ND	14.763,38
Granito	0,96	14.943,46	ND	14.943,46
Reboco	0,47	59.682,21	315,00	23.731,25
Esquadria de Alumínio	8,43	6.553,32	ND	6.553,32
Vidro	20,00	17.386,80	ND	17.386,80
Tinta	2,36	26.652,66	ND	26.652,66
TOTAL:		336.433,76	TOTAL:	267.243,48
Estrutura				
Concreto FCK 40 Mpa	350,47	1.479.246,25	339,45	1.432.733,59
Aço	1,62	708.443,82	0,74	325.118,86
TOTAL:		2.187.690,07	TOTAL:	1.757.852,45
Fundação				
Concreto FCK ≥ 20 Mpa	243,10	292.240,23	226,15	271.863,96
Aço	1,62	30.094,71	0,74	13.811,06
TOTAL:		322.334,94	TOTAL:	285.675,02
DAP / Ecoinvent / Literatura:		2.929.973,95 kgCO₂eq	Sidac	2.383.121,80 kgCO₂/kg
		265,22 kgCO₂eq/m²		215,72 kgCO₂/m²
		5,30 kgCO₂eq/m².a		4,31 kgCO₂/m².a

iii. Tipologia 03

Parte e Material de Construção	F. Carac.	DAP/Ecoinvent/Lit. (kgCO ₂ eq)	Sidac CO ₂ (kg)	
Cobertura				
Argamassa Colante	0,204	52.958,70	384,60	53.599,78
Bloco de Concreto	0,11	24.164,14	0,55 (un)	12.853,26
Contra Piso	0,151	44.192,64	226,15	31.517,39
Isolamento – manta geotextil	1,08	1.204,11	ND	1.204,11
Isolamento EPS	4,76	7.297,15	ND	7.297,15
Manta asfáltica	0,25	7.665,08	ND	7.665,08
Porcelanato	0,13	15.101,59	ND	15.101,59
TOTAL:		152.583,41	TOTAL:	129.238,36
Fachadas				
ACM	26,70	7.386,56	ND	7.386,56
Argamassa Colante	0,204	4.712,00	384,60	4.769,04
Pastilha Cerâmica	0,87	18.992,65	ND	18.992,65
Porcelanato	0,13	1.755,57	ND	1.755,57
Granito	0,96	6.550,85	ND	6.550,85
Reboco	0,47	136.218,79	315,0	54.164,25
Bloco de Concreto	0,11	193.510,57	0,55 (un)	102.931,15
Esquadria de Alumínio	8,43	11.411,73	ND	11.411,73
Vidro	20,00	39.000,38	ND	39.000,38
Tinta	2,36	49.466,47	ND	49.466,47
TOTAL:		469.005,98	TOTAL:	296.429,06
Estrutura				
Concreto FCK 40 Mpa	350,47	2.363.867,58	339,45	2.289.539,33
Aço	1,62	1.131.568,70	0,74	519.299,23
TOTAL:		3.495.436,28	TOTAL:	2.808.838,56
Fundação				
Concreto FCK ≥ 20 Mpa	243,10	466.783,60	226,15	434.237,40
Aço	1,62	48.069,05	0,74	22.059,83
TOTAL:		514.952,65	TOTAL:	456.297,23
DAP / Ecoinvent / Literatura:		4.631.878,32 kgCO₂eq.	Sidac:	3.690.803,22 kgCO₂/kg
		292,71 kgCO₂eq./m²		233,24 kgCO₂/m²
		5,85 kgCO₂eq./m².a		4,66 kgCO₂/m².a

