



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO**

**AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE CARBONO DE UMA EDIFICAÇÃO  
COMPLETA**

Análise comparativa entre dados de projeto e de obra

**MARCELLA CLARIMUNDO FERREIRA SILVA**

Brasília, DF.

2025

---

© 2025

Todos os direitos autorais reservados a Marcella Clarimundo Ferreira Silva

A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: maclarimundofs@gmail.com

MARCELLA CLARIMUNDO FERREIRA SILVA

**Avaliação da emissão de carbono de uma edificação completa: uma análise comparativa entre dados reais de projeto e de obra.**

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 DO Ambiente Construído.

Orientadora: Chenia Rocha Figueiredo.

Coorientador: Lucas Rosse Caldas

Brasília, 23 de maio de 2025.

Banca Examinadora:

---

Examinador Interno / Prof. Dr. Daniel Richard Sant'Ana

Universidade de Brasília

---

Examinador Externo / Profa. Dra. Nathalie Barbosa Reis Monteiro

Universidade Presbiteriana Mackenzie

*Esta dissertação nasceu da coragem de trilhar caminhos desconhecidos e da busca incansável por conhecimentos que, em outros tempos, eu sequer ousaria imaginar. Cada etapa deste percurso foi guiada por uma grande determinação semeada e cultivada ao longo da minha vida ao observar, com profunda admiração, o exemplo dos meus pais, José Clarimundo e Ligia Clarimundo.*

*Se hoje cheguei até aqui, é porque vocês trilharam, com muito esforço e dignidade, um caminho árduo. Vindos de uma realidade simples e humilde, enfrentaram inúmeras adversidades e desafios, mas nunca mediram esforços para garantir meu acesso a educação de excelência e aos melhores recursos. Vocês sempre foram meus pilares sólidos, mantiveram-se ao meu lado, foram meus exemplos dentro e fora de casa, e se hoje, conquistei aqui uma pequena fração se quer do conhecimento que vocês, mesmo sem as melhores oportunidades, adquiriram ao longo de suas vidas, me considero uma pessoa de extrema sorte.*

*Essa conquista não é apenas minha. Ela é fruto do trabalho silencioso, das renúncias diárias, da fé inabalável e do amor incondicional dos meus pais que, mesmo sem as oportunidades que hoje tenho, abriram caminhos para que eu pudesse sonhar mais alto.*

*Aos meus pais, José e Ligia, meus primeiros e maiores exemplos de força, perseverança, humildade e amor, que nasceram na zona rural de Minas Gerais, dedico esta dissertação com todo o meu amor, gratidão e admiração eternos.*

*Tudo o que sou e conquistei carrega, em sua essência, a história de vocês.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço profundamente à minha orientadora, Chenia Rocho, por me acolher de braços abertos, mesmo sem me conhecer. Sou imensamente grata por ter acreditado em mim desde o início. Foi ela quem me ensinou o verdadeiro significado de ser uma pesquisadora — guiou-me com paciência por cada etapa dessa trajetória, apontou caminhos, abriu portas e esteve presente em todos os momentos, oferecendo orientação, apoio e generosidade. Chenia esteve ao meu lado nos dias bons e especialmente nos difíceis, incentivando-me, fazendo-me sorrir e acreditando no meu potencial. Sem ela, esta conquista não teria sido possível. Com todo o carinho, respeito e admiração, agradeço por tudo o que me ensinou e por ter me transformado em uma pesquisadora mais confiante e preparada. Você é, e sempre será, uma referência profissional e pessoal para mim. Muito obrigada!

Agradeço imensamente ao meu coorientador, Lucas Rosse Caldas, que, mesmo à distância, esteve presente em todos os momentos desta caminhada. Lucas foi, e continua sendo, um dos grandes pilares da minha formação acadêmica. Com paciência e extrema generosidade, guiou-me passo a passo, ampliando minha visão a cada orientação e conversa, sempre abrindo minha mente para novas possibilidades. Sou profundamente grata por sua confiança no meu potencial, por ter apostado em mim e por todas as palavras de apoio e incentivo que recebi ao longo dessa jornada. Cada uma delas me fortaleceu e me impulsionou a seguir com ainda mais determinação. Ter o senhor ao meu lado foi, e é, uma experiência profundamente enriquecedora. Com muito carinho e admiração, muito obrigada!

Agradeço ao Professor Dr. Caio Frederico Silva e a Professora Dra. Joara Cronemberger, que me acolheram com muita generosidade, respeito e paciência. Sou extremamente grata por cada palavra de apoio, incentivo, por toda conversa e troca que tivemos, vocês foram essenciais nessa jornada.

Agradeço ao meu irmão, Kahio de Paula, pelas palavras de apoio, confiança, afeto e lealdade. À minha sobrinha, Eduarda Sanches, pelo companheirismo, amizade e amor incondicional. E à minha prima, Mariana Prates, pelo incentivo para que eu trilhasse meu espaço no meio acadêmico.

Agradeço ao Igor Ribeiro pelo amor, companheirismo e pela paciência nos dias mais conturbados. Por estar ao meu lado mesmo quando tudo parecia difícil, por me ajudar a manter a calma, me incentivar a persistir e me lembrar da força que eu tinha, mesmo quando eu esquecia. Obrigada por todas as vezes em que me disse: “calma, vai dar certo”, por acreditar no

meu sonho como se fosse seu, e por me apoiar, mesmo sem saber exatamente como. Obrigada por não desistir de mim nos momentos em que o estresse e a ansiedade me tornaram difícil de lidar. E, sobretudo, obrigada por vibrar por cada conquista minha com o mesmo entusiasmo de quem também a conquistou.

Agradeço ao meu amigo Bruno Côrtes e às minhas amigas Karina Santos, Brenda Rodrigues e Raíra Souza por acreditarem em mim desde o início e me incentivarem a seguir esse sonho. Sou imensamente grata por todas as conversas, pelas alegrias compartilhadas, pelas palavras de apoio e pela presença constante, nos momentos difíceis e nos felizes. Obrigada por enxergarem em mim uma força e um potencial que, por vezes, eu mesma não conseguia ver. Ter vocês ao meu lado tornou essa caminhada mais leve e possível.

Agradeço aos meus colegas Isabella Botelho, Lucídio Gomes e Cynthia Shishido pelas matérias e trabalhos finalizados juntos, pelas conversas sobre meu tema da dissertação, pelo conhecimento dividido, pelo apoio quando precisei e por me incentivar a continuar na academia.

Agradeço aos funcionários do canteiro de obras que visitei para realização da coleta de dados desta pesquisa. Obrigada por me receberem com muito respeito e paciência, por me ajudarem a coletara cada informação necessária, por me tratarem com tanta educação, agradeço imensamente a colaboração de vocês.

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

## **RESUMO**

Diante da crescente urgência em mitigar os efeitos das mudanças climáticas, o setor da construção civil destaca-se como um dos maiores emissores globais de gases de efeito estufa (GEEs), respondendo por cerca de 39% das emissões relacionadas à energia, o que reforça a necessidade de diagnósticos ambientais precisos ao longo do ciclo de vida das edificações. Este estudo quantifica as emissões embutidas de carbono na construção de uma edificação residencial multifamiliar de alto padrão com seis pavimentos, em Brasília-DF, aplicando a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), no escopo do berço ao canteiro de obras (A1-A5), abrangendo fundação, estrutura, envoltória, partições e acabamentos internos. A análise utilizou dados do projeto executivo e dados reais coletados no canteiro, permitindo comparar previsões orçamentárias e consumo efetivo de materiais. Foram empregados inventários reconhecidos, como Ecoinvent e Declarações Ambientais de Produto (DAPs), considerando vida útil de 50 anos. Os resultados indicaram um total de 393,73 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> de emissões embutidas (dados de obra), com a estrutura como principal emissor (47%), seguida por acabamentos internos (23%) e fundação (7,3%). O concreto foi o material mais emissivo, com 141,63 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>, devido ao alto volume, seguido por aço (61,18 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>) e granito (21,40 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>). A comparação entre projeto e obra revelou aumento de 16,54% nas emissões totais, com discrepâncias marcantes nos materiais e nas distâncias de transporte, especialmente em fundação e acabamentos. Os achados destacam a limitação dos orçamentos prévios como única fonte de dados ambientais e reforçam a importância de integrar dados reais à ACV, contribuindo para métricas robustas na criação de benchmarks nacionais de carbono e estratégias eficazes de descarbonização no setor.

Palavras-chave: ACV, Emissões Embutidas, Dados de Obra, Perdas de Materiais, Construção Civil.

## **ABSTRACT**

Given the growing urgency to mitigate the effects of climate change, the construction sector stands out as one of the largest global emitters of greenhouse gases (GHGs), accounting for approximately 39% of energy-related emissions. This underscores the need for precise environmental assessments throughout the building life cycle. This study quantifies the embodied carbon emissions associated with the construction of a high-end six-story multifamily residential building in Brasília, Brazil, using the Life Cycle Assessment (LCA) methodology, with a cradle-to-construction site scope (stages A1–A5), covering the foundation, structure, envelope, internal partitions, and interior finishes. The analysis was based on executive project data and actual data collected directly on-site, enabling a comparison between budget forecasts and the effective consumption of materials. Secondary data were drawn from recognized inventories such as Ecoinvent and Environmental Product Declarations (EPDs), assuming a 50-year service life. Results indicated a total of 393.73 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> of embodied emissions (based on actual construction data), with the structure as the main contributor (47%), followed by interior finishes (23%) and the foundation (7.3%). Concrete was the most emission-intensive material, with 141.63 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>, due to its high usage volume, followed by steel (61.18 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>) and granite (21.40 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>). The comparison between project and actual construction data revealed a 16.54% increase in total emissions, highlighting significant discrepancies in material use and transport distances, especially in the foundation and finishes. These findings emphasize the limitations of relying solely on preliminary budgets for environmental analyses and highlight the importance of integrating actual data into LCA models, contributing robust metrics for developing national carbon benchmarks and more effective decarbonization strategies in the construction sector.

**Keywords:** LCA, Embodied Emissions, As-Built Data, Material Waste, Construction Industry.

## **Lista de Figuras**

Figura 1 - Fluxograma do processo final de seleção dos artigos para leitura.....	12
Figura 2 - Entradas e saídas do ciclo de vida. ....	18
Figura 3 - Estágios do Ciclo de Vida de uma edificação. ....	23
Figura 4 - Fluxo metodológico para condução da ACV neste estudo.....	34
Figura 5 - Fases do ciclo de vida da edificação considerados neste estudo. ....	36
Figura 6 - Localização do Setor Noroeste, Brasília - DF. ....	39
Figura 7 - Proposta para áreas de expansão urbana do Brasília Revisitada. ....	40
Figura 8 - 2º Etapa de implementação do Setor Noroeste: Projeções ocupadas, com canteiro de obras e vagas.....	41
Figura 9 - Projeção de implantação da edificação em estudo: Projeção C.....	43
Figura 10 - Planta baixa do pavimento tipo da edificação em estudo. ....	43
Figura 11 - Detalhamento da Fundação tipo sapata e imagem das sapatas do edifício avaliado. ....	45
Figura 12 - Presença de rocha arenita no terreno do edifício avaliado.....	45
Figura 13 - Projeto estrutural das vigas baldrames do edifício avaliado.....	46
Figura 14 - Detalhe do corte AA do projeto estrutural das vigas baldrames do edifício avaliado. ....	46
Figura 15 - Detalhe do corte AA do projeto estrutural que apresenta parte da cortina de contenção do edifício avaliado. ....	47
Figura 16 - Corte Longitudinal (AA) da edificação em estudo. ....	47
Figura 17 - Modelo padrão para os módulos da fachada unitizada feito no canteiro de obras.	48
Figura 18 - Fachada frontal da edificação em estudo. ....	49
Figura 19 - Fachada lateral direita e lateral esquerda. ....	49
Figura 20- Recorte da planilha de orçamento disponibilizada pela construtora.....	53
Figura 21 - Consumo de água da obra no ano 2022 e parcial no ano de 2023.....	54
Figura 22 - Nota fiscal do material aço fotografada no canteiro de obras.....	55
Figura 23 - Nota fiscal do material bloco cerâmico fotografada no canteiro de obras pela autora. ....	56
Figura 24 - Nota fiscal de locação de maquinário fotografada no canteiro de obras pela autora. ....	56
Figura 25 - Página fotografada do controle de volume de concreto da obra.....	57

Figura 26 - Modelo de tabela da primeira planilha de avaliação do ICV dos estágios A1-A3 por elemento da edificação. ....	60
Figura 27 - Modelo de planilha utilizada para cálculo do ICV do estágio A4. ....	63
Figura 28 - Índice de perda/diferença por material. ....	74
Figura 29 - Emissões embutidas de GEEs por elemento da edificação para dados de projeto e de obra, para os estágios A1-A3. ....	79
Figura 30 - Percentual de participação nas emissões do grupo piso por material. ....	84
Figura 31 - Percentual de participação nas emissões do grupo parede por material. ....	85
Figura 32 - Percentual de participação nas emissões do grupo teto por material. ....	85
Figura 33 - Emissões por material construtivo por m <sup>2</sup> para dados de obra nos estágios A1-A3. ....	87
Figura 34 - Percentual de participação nas emissões do estágio A4 por elemento da edificação. ....	90
Figura 35 - Comparativo entre as emissões embutidas de GEEs por elemento da edificação e fonte de dados para o estágio A4. ....	91
Figura 36 - Comparativo das emissões embutidas de GEEs do estágio A1-A3 e A4 para dados de projeto e obra por elemento. ....	96
Figura 37 - Emissões por material construtivo por m <sup>2</sup> para dados de obra nos estágios A4....	97
Figura 38 - Emissões por fator analisado no estágio A5. ....	99
Figura 39 - Participação percentual de cada componente do estágio A5. ....	99
Figura 40 - Emissões do estágio A5 por m <sup>2</sup> de área construída da edificação. ....	100
Figura 41 - Percentual de participação de cada estágio no PAG total da edificação para dados de obra. ....	102
Figura 42 - Somatória das emissões embutidas de GEEs da edificação por m <sup>2</sup> de área construída para cada estágio do ciclo de vida analisado. ....	102
Figura 43 - Emissões por material do elemento estrutura por m <sup>2</sup> de área construída com dados de obra. ....	103
Figura 44 - Emissões de A1-A4 por material do elemento acabamentos internos por m <sup>2</sup> de área construída com dados de obra. ....	106
Figura 45 - Emissões por material do elemento envoltória por m <sup>2</sup> de área construída com dados de obra. ....	107
Figura 46 - Percentual de participação nas emissões totais da edificação analisada com dados de obra. ....	110

Figura 47 - Emissões por material do elemento partições internas por m <sup>2</sup> de área construída com dados de obra.....	110
Figura 48 - Percentual de participação de cada estágio no PAG total da edificação.....	112
Figura 49 - Comparativo das EEs para dados de obra (DO) e dados de projeto (DP) por elemento e estágio analisado.....	112
Figura 50 - Emissões de carbono embutido parciais e totais para cada fonte de dados.....	115
Figura 51 - Sistema de Rotulagem de Carbono LETI 2030 e comparação com LETI 2020 para emissões embutidas iniciais (A1-A5).....	116
Figura 52 - Emissões embutidas de GEEs por ano com base nos dados reais de obra e dados de projeto.....	119
Figura 53 - Determinação da vida útil de projeto (VUP) e fator de reposição.....	127

## **Lista de Quadros**

Quadro 1 - Fase I - Definição das PCs e aplicação dos <i>Wild Cards</i> .....	10
Quadro 2 - Fase I: Formação das <i>Querys</i> de busca utilizando os operadores <i>and</i> e <i>or</i> .....	11
Quadro 3 - Fases para a condução da ACV de acordo com a NBR 14040:2009a .....	<b>Erro!</b>

## **Indicador não definido.**

Quadro 4 - Informações para condução da ACV neste estudo.....	38
Quadro 5 - Principais critérios para escolha da edificação.....	42
Quadro 6 - Principais características da edificação.....	44
Quadro 7 - Quadro de áreas da edificação.....	44
Quadro 8 - Materiais construtivos avaliados para cada elemento da edificação.....	51
Quadro 9 - Dados coletados por estágio analisado segundo o tipo de documento.....	58
Quadro 10 - Cenário de ocupação da edificação em estudo.....	121
Quadro 11 - Valores de referência da literatura para emissões embutidas de GEEs por pessoa por ano.....	122

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1 - Fator de carbono adotado para os materiais inventariados do estágio A1 ao A3....	61
Tabela 2 - Fator de carbono do transporte rodoviário. ....	62
Tabela 3 - Fator de carbono da eletricidade. ....	64
Tabela 4 - Fator de carbono da água.....	65

Tabela 5 - Consumo de diesel por maquinário.....	66
Tabela 6 - Fator de carbono do combustível diesel adotado neste estudo.....	66
Tabela 7 - Fator de carbono do transporte rodoviário.....	67
Tabela 8 - Fator de carbono do diesel.....	68
Tabela 9 - Emissões embutidas de GEEs dos estágios A1-A3.....	71
Tabela 10 - Emissões embutidas de GEEs dos estágios A1-A3.....	77
Tabela 11 - Emissões embutidas de GEEs do estágio A4 .....	89
Tabela 12 - Emissões embutidas em kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>2</sup> de área construída para cada material...	104
Tabela 13 - missões embutidas de GEEs da edificação analisada.....	126

## ***Lista de Equações***

Equação 1 .....	60
Equação 2 .....	63
Equação 3 .....	63
Equação 3.1 .....	64
Equação 3.2 .....	64
Equação 3.3 .....	65
Equação 3.4 .....	66
Equação 3.5 .....	67

## **Lista de Abreviaturas e Siglas**

<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>GEEs</b>	Gases de Efeito Estufa
<b>IPCC</b>	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)
<b>COP</b>	Conferência das Partes
<b>ODS</b>	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
<b>Mt</b>	Milhões de toneladas
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de Carbono
<b>PNUMA</b>	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
<b>Gt</b>	Giga tonelada
<b>EE</b>	Emissões Embutidas
<b>EO</b>	Emissões Operacionais
<b>ONU</b>	Organização das Nações Unidas
<b>IBGE</b>	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
<b>CO<sub>2eq</sub></b>	Dióxido de carbono equivalente
<b>NDC</b>	<i>Nationally Determined Contributions</i> (Contribuições Nacionalmente Determinadas)
<b>ACV</b>	Avaliação do Ciclo de Vida
<b>SBCE</b>	Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões
<b>PCs</b>	Palavras-chave
<b>BD</b>	Banco de Dados
<b>PNMC</b>	Política Nacional sobre a Mudança do Clima
<b>CH<sub>4</sub></b>	Metano
<b>N<sub>2</sub>O</b>	Óxido Nitroso
<b>F-gases</b>	Gases Fluorados
<b>IPPU</b>	Indústria de Produtos e Processos Urbanos
<b>SETAC</b>	<i>Society of environmental Toxicology and Chemistry</i> (Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental)
<b>ISO</b>	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional para Padronização)
<b>IPP</b>	<i>Integrated Product Policy</i> - Política Integrada ao Produto

<b>ILCD</b>	<i>International Reference Life Cycle Data System Handbook</i> (Manual do Sistema Internacional de Referência para Dados do Ciclo de Vida)
<b>DAP</b>	Declaração Ambiental de Produto
<b>EPD</b>	<i>Environmental Product Declaration</i>
<b>SIDAC</b>	Sistema de Informação para Declarações Ambientais de Produtos
<b>NBR</b>	Norma Brasileira
<b>EN</b>	<i>European Standard</i> (Norma Europeia)
<b>CE</b>	Carbono Embutido
<b>CO</b>	Carbono Operacional
<b>CCS</b>	<i>Carbon Capture and Storage</i> (Captura e Armazenamento de Carbono)
<b>CLT</b>	<i>Cross Laminated Timber</i> (Madeira Laminada Cruzada)
<b>GWP</b>	<i>Global Warming Potencial</i>
<b>PAG</b>	Potencial de Aquecimento Global
<b>LETI</b>	<i>London Energy Transformation Initiative</i>
<b>LCBI</b>	<i>Low Carbon Building Initiative</i>
<b>kg CO<sub>2</sub></b>	Quilograma de dióxido de carbono equivalente
<b>kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup></b>	Quilograma de dióxido de carbono equivalente por metro quadrado
<b>MDIC</b>	Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços
<b>CTIBC</b>	Comitê Técnico da Indústria de Baixo Carbono
<b>SEV</b>	Secretaria de Economia Verde, Descarbonização e Bioindústria
<b>IDDI</b>	<i>Industrial Deep Decarbonization Initiative</i> (Iniciativa para a Descarbonização Profunda da Indústria)
<b>MMA</b>	Ministério de Meio Ambiente e Mudança do Clima
<b>CNI</b>	Confederação Nacional da Indústria
<b>VUP</b>	Vida Útil de Projeto
<b>USGBC</b>	<i>United States Green Building Council</i>
<b>PAF</b>	Percentual de Abertura na Fachadas
<b>MPA</b>	Megapascal
<b>PVA</b>	Acetato de Polivinila
<b>FC</b>	Fator de Carbono
<b>kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>.ano</b>	Quilograma de dióxido de carbono equivalente por metro quadrado por ano
<b>kg CO<sub>2</sub>-eq/pessoa.ano</b>	Quilograma de dióxido de carbono equivalente por pessoa por ano

<b>M<sup>2</sup></b>	Metro quadrado
<b>M<sup>3</sup></b>	Metro cúbico
<b>LEED</b>	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i> (Liderança em Energia e Design Ambiental)
<b>ICV</b>	Inventário do Ciclo de Vida

# SUMÁRIO

## Capítulo I – Introdução | Justificativa | Objetivo | Estrutura da Dissertação

1	Introdução .....	2
1.1	Justificativa .....	5
1.2	Objetivo .....	7
1.3	Estrutura da Dissertação .....	7

## Capítulo II – Referencial Teórico

2	Referencial Teórico .....	10
2.1	Metodologia aplicada a revisão bibliográfica .....	10
2.2	Mudanças Climáticas e o ambiente construído .....	13
2.3	Abordagem do ciclo de vida na avaliação de edificações .....	17
2.4	Abnt nbr isso 14040:2014 – gestão ambiental – princípios e estrutura .....	20
2.5	En 15798:2011 – avaliação do desempenho ambiental de edificações .....	22
2.6	Emissões embutidas de carbono .....	24
2.7	Edificação de baixo carbono .....	27

## Capítulo III – Materiais e Métodos

3	Materiais e métodos.....	32
3.1	Definição do objetivo e escopo da acv .....	35
3.1.1	Objetivo: Aplicações pretendidas .....	35
3.1.2	Limitações do método, suposições e impactos abrangidos .....	36
3.1.3	Público-alvo .....	37
3.1.4	Vida útil e Unidade Declarada .....	37
3.1.5	Bases de dados utilizadas .....	37
3.1.6	Metodologia de avaliação .....	38
3.1.7	Estrutura de modelagem do Inventário de Ciclo de Vida (ICV) .....	38
3.2	Estudo de caso .....	39
3.2.1	Elementos edilícios abrangidos pelo estudo .....	44
3.3	Inventário do ciclo de vida – icv .....	50
3.3.1	Coleta de Dados .....	50
3.3.2	Dados de Projeto .....	52

3.3.3 Dados Reais de Obra .....	53
3.3.4 Modelagem do Inventário de Ciclo de Vida .....	58

## **Capítulo IV – Resultados e Discussões**

4      Resultados e discussões .....	70
4.1    Avaliação do ciclo de vida da edificação .....	70
4.1.1 Contribuição dos materiais para as emissões embutidas associadas às perdas totais .....	73
4.1.2 Emissões embutidas de GEEs: Estágios A1-A3 .....	76
4.1.3 Emissões embutidas de GEEs: Estágios A4 e A5 .....	87
4.1.4 Emissões embutidas de GEEs: Estágios A1-A5 .....	100
4.2    Análise de benchmarking .....	112
4.3    Análise geral da emissão embutida de carbono da edificação avaliada .....	121
4.3.1 Emissões relacionadas aos materiais (A1-A3) .....	123
4.3.2 Emissões relacionadas ao transporte de materiais (A4) .....	125
4.3.3 Emissões relacionadas aos processos construtivos (A5) .....	126
4.3.4 Análise geral .....	127

## **Capítulo V – Conclusões**

5      Conclusões finais .....	130
--------------------------------	-----

## CAPÍTULO I

Introdução | Justificativa | Objetivos | Estrutura da Dissertação

## 1 INTRODUÇÃO

A construção civil desempenha um papel essencial no desenvolvimento das cidades, influenciando diretamente a qualidade de vida dos habitantes e moldando o espaço urbano. No entanto, essa atividade, ao mesmo tempo em que promove crescimento econômico e habitacional, é uma das maiores responsáveis pelos impactos ambientais globais.

Reflexões sobre a compatibilidade entre as práticas construtivas e a sustentabilidade ambiental têm ganhado força, impulsionadas por movimentos como o Manifesto por uma frugalidade feliz e criativa na Arquitetura e Planejamento de Áreas Urbanas e Rurais e a iniciativa europeia *Unissons - Towards Low-Carbon and Living Architecture*. Essas iniciativas destacam a importância de revisitar os paradigmas tradicionais da arquitetura e da construção, incentivando uma abordagem que valorize soluções de baixo carbono e que sejam resilientes às mudanças climáticas e à perda de biodiversidade associada ao setor (Girard, 2024). Nesse cenário, a construção civil assume um papel estratégico não apenas na criação de espaços habitáveis, mas também como protagonista na busca por cidades mais sustentáveis e alinhadas às necessidades das gerações futuras.

A busca pela redução das emissões de gases de efeito estufa (GEEs) tem sido uma prioridade mundial, com convenções, relatórios e políticas globais destacando a relevância do tema. Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pelas Nações Unidas, os relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) e os compromissos firmados em conferências internacionais, como a Conferência das Partes (COP), têm sublinhado a necessidade de ações coordenadas para mitigar os impactos ambientais do setor.

Entretanto, as emissões globais continuam a crescer, impulsionadas por práticas insustentáveis no consumo de energia, no uso da terra e na mudança de uso do solo. Entre 2019 e 2023, por exemplo, as emissões relacionadas à energia aumentaram em cerca de 900 Mt (milhões de toneladas), enquanto aquelas vinculadas às edificações cresceram 50% entre 1990 e 2019. Em 2023, as emissões globais de CO<sub>2</sub> provenientes da combustão de energia, processos industriais e queima de gás atingiram um novo recorde de 37,4 bilhões de toneladas, enfatizando a necessidade de mudanças significativas (Calvin *et al.*, 2023; IEA, 2024).

No setor de edificações e construção, o impacto é ainda mais alarmante: este segmento é responsável por 21% das emissões globais de GEE e, em 2022, alcançou 37% das emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas à energia e processos. A fabricação de materiais intensivos em carbono,

como aço, alumínio e concreto, sozinha gera aproximadamente 2,3 GtCO<sub>2</sub> (giga toneladas), representando mais de 6% das emissões globais. Materiais como vidro e tijolo contribuem com 1,2 GtCO<sub>2</sub> (2 a 4% das emissões globais), enquanto o transporte e outras indústrias ligadas ao setor respondem por 63% (PNUMA, 2024).

Considera-se ser inviável enfrentar as mudanças climáticas sem transformações profundas na construção civil. A implementação de estratégias voltadas para a redução de emissões embutidas (EE) e operacionais (EO) se torna essencial para atingir os ODS da ONU, ultrapassando o foco do ODS 13 e contribuindo para outros 15 objetivos (Calvin *et al.*, 2023; Habert *et al.*, 2020; PNUMA, 2024).

Embora as primeiras pesquisas no setor da construção tenham focado na redução das EO por meio de estratégias de eficiência energética, o papel das EE – associadas à fabricação, transporte, construção e descarte de materiais – tem se tornado cada vez mais relevante. No contexto das edificações, estudos indicam que as EE já representam entre 40% e 50% das emissões totais de CO<sub>2</sub> ao longo de seu ciclo de vida, sendo aproximadamente 30% dessas emissões vinculadas às etapas iniciais de construção (WBCSD; ARUP, 2023; Carcassi *et al.*, 2022; Karlsson *et al.*, 2021; Röck *et al.*, 2020).

Esse cenário é agravado pelo aumento na produção de materiais intensivos em carbono, como cimento e aço, que figuram entre os principais responsáveis pelas emissões no setor. Diante disso, pesquisadores têm intensificado esforços para desenvolver estratégias que reduzam o carbono embutido em edificações, com destaque para melhorias nos processos construtivos e a incorporação de materiais mais sustentáveis (Carcassi *et al.*, 2022).

A COP29, realizada em 2024, destacou a importância de repensar o papel do setor da construção nas mudanças climáticas, sublinhando a necessidade urgente de transformar as práticas de construção e uso de edifícios. A redução das emissões de carbono associadas aos edifícios representa uma oportunidade significativa, não apenas para novos projetos, mas também para a reabilitação de edificações existentes. A reutilização de estruturas pode resultar em uma redução de até 75% das emissões de carbono, em comparação com a construção de novos edifícios. Essa transformação das práticas de construção exige mudanças tanto técnicas quanto culturais, uma vez que as abordagens tradicionais e o patrimônio arquitetônico podem desempenhar um papel fundamental na mitigação do impacto ambiental do setor (Ferriss, 2024).

No Brasil, a construção civil atua como pilar econômico e gerador de empregos. Em 2024, registrou crescimento de 3,5% no segundo trimestre, superando a alta de 1,4% da economia geral, segundo o IBGE. Entre janeiro e julho, foram criadas mais de 20 mil vagas formais, com destaque para a construção de edifícios (40,32% dos empregos) e serviços especializados (34,12%) (CBIC, 2024).

Apesar disso, o setor enfrenta o desafio de descarbonizar sua cadeia produtiva, altamente dependente de materiais como cimento e aço. Em 2022, as edificações geraram 6% das emissões nacionais, o equivalente a 29,9 MtCO<sub>2</sub>eq, sem contabilizar as emissões relacionadas à produção de materiais (Brasil, 2022).

Sob a perspectiva das emissões embutidas, a demanda por materiais de construção no Brasil é expressivamente elevada. A construção civil brasileira gera mais de 50% dos resíduos sólidos do país, com 48 milhões de toneladas em 2021. O setor enfrenta desafios para descarbonizar suas atividades, embora avanços como biomateriais e tecnologias de baixo carbono sejam promissores. O aumento global das emissões embutidas nos materiais e processos construtivos permanece como uma preocupação urgente. A NDC do Brasil propõe medidas para redução de tais emissões, mas lacunas na implementação de políticas comprometem o alcance da neutralidade de carbono até 2050 (Crippa *et al.*, 2023; Instituto Talanoa, 2023; CBIC; Senai, 2022).

Pimenta (2020) afirma ser cada vez mais notório o rastreio de novas metodologias que auxiliem na análise do impacto das edificações sobre o meio ambiente. Nesse cenário, o uso da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) vem se consolidando cada vez mais. Pesquisadores como Carvalho *et al.* (2021), Röck *et al.* (2022), Bianchi *et al.* (2021) e Karlsson *et al.* (2021) reforçam essa afirmação em seus estudos, enfatizando a relevância da metodologia para acessar o impacto ambiental do ambiente construído e salientam a carência de pesquisas acerca das emissões embutidas de GEEs.

Contudo, Pimenta (2020) também relata a escassez de publicações brasileiras a cerca desse tema, explica que a maioria dos estudos encontrados referem-se a países de clima temperado, e destaca a revisão bibliográfica feita por Ramesh *et al.* (2010), onde os autores ressaltam a necessidade de pesquisas voltadas para climas tropicais, uma vez que, além da distinção climática, a matriz energética dos países de clima tropical difere-se da matriz de países europeus, asiáticos e norte-americanos, e o uso energético para resfriamentos artificial é maior.

Em tal conjuntura, analisar as emissões embutidas ao longo do ciclo de vida das edificações torna-se, assim, uma abordagem indispensável para compreender, buscar estratégias e reduzir os impactos ambientais do setor, especialmente diante da crescente demanda por práticas mais sustentáveis. Para alcançar as metas estabelecidas pela agenda climática, é crucial aprofundar o estudo de metodologias e dados que possam promover avanços nas pesquisas voltadas para a superação das barreiras existentes. Ao propor uma avaliação detalhada dessas emissões utilizando a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), esta dissertação pretende contribuir para o avanço das discussões científicas, oferecendo subsídios técnicos que possam orientar políticas públicas, práticas construtivas mais alinhadas às metas climáticas, aos ODS e a transição para um modelo econômico de baixo carbono.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

É inegável que o ambiente construído exerce uma pressão significativa sobre os recursos naturais e o meio ambiente (Ferriss, 2024). A importância de abordar as fases não operacionais do ciclo de vida dos edifícios — que incluem a fabricação de materiais, a construção, a desmontagem e o processamento de resíduos — é ainda mais acentuada pela falta de regulamentação e avaliação adequada dos impactos associados a essas etapas. Apesar do setor da construção ter avanços em reduzir os impactos operacionais, a falta de avaliações eficazes da fase de fabricação e descarte impede uma análise completa dos possíveis impactos ambientais (Carvalho *et al.*, 2021; Mesa *et al.*, 2021).

Nesse contexto, o presente estudo se torna relevante ao quantificar as emissões embutidas de uma edificação, não apenas com base em orçamentos pré-projetos, mas também por meio da coleta de dados reais no canteiro de obras, que considera o consumo efetivo de materiais. Na prática, a obtenção de dados reais de obras é bastante difícil, conforme será detalhado na revisão da literatura sendo, portanto, uma grande contribuição do presente trabalho.

O estudo de caso se concentra em uma tipologia de edificação frequentemente construída em Brasília, abrangendo etapas cruciais, como fundação, estrutura, envoltória, vedações internas e acabamentos. Trata-se de uma edificação residencial de alto padrão, cuja análise detalhada é particularmente relevante por representar uma tipologia ainda pouco estudada no contexto brasileiro. A escolha desse tipo de edificação permite evidenciar especificidades construtivas, padrões de consumo de materiais e suas emissões em elementos

construtivos e estágios do ciclo de vida muitas vezes negligenciados em estudos que focam em tipologias mais usuais ou de menor complexidade técnica.

Essa abordagem permitirá uma avaliação ampla do impacto ambiental resultante da construção, oferecendo uma perspectiva valiosa sobre as emissões de carbono associadas. Ao contribuir para o entendimento das emissões em edificações completas, a pesquisa pretende não apenas fornecer um panorama geral sobre o impacto do aquecimento global, mas também propor estratégias concretas para a redução das emissões de carbono.

Deste modo, os resultados desta investigação almejam estabelecer parâmetros que possam servir como benchmarks e metas de carbono para edificações brasileiras, promovendo a escolha de materiais sustentáveis já na fase de projeto. No presente, muitos países já estabeleceram regulamentações com metas de carbono para as edificações, com foco principal nas fases de projeto. Embora muitos países já tenham implementado regulamentações com metas de carbono para edificações, grande parte dessas metas está centrada na fase de projeto (IEA, 2022).

No entanto, sem estudos alimentados com dados reais, é difícil determinar se o consumo de materiais e as emissões durante a construção superam as estimativas feitas na fase projetual (IEA, 2022). É importante avaliar quanto de emissões são geradas pelo desperdício de materiais e inesperadas durante a execução da obra. Assim, compreender as discrepâncias entre as emissões calculadas no projeto e aquelas geradas na construção é fundamental para avaliar a eficácia dessas regulamentações e para definir parâmetros de carbono que reflitam de maneira mais precisa o impacto ambiental real das edificações ao longo de todo o seu ciclo de vida.

No contexto brasileiro, em novembro de 2024, após a COP29, a Câmara dos Deputados aprovou o projeto de lei que regulamenta o mercado de carbono no Brasil. A proposta cria o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), que estabelece limites para as emissões de gases de efeito estufa em setores específicos, tais como transporte, indústria e construção civil, e permite a negociação de créditos de carbono entre empresas. Essa regulamentação visa cumprir as metas brasileiras no Acordo de Paris, além de atrair investimentos internacionais, fortalecendo a economia de baixo carbono. Essa informação destaca a necessidade de aprofundar os estudos sobre as emissões de carbono das edificações gerando resultados mais condizentes com a realidade, dado que elas se relacionam diretamente a mais de três setores estratégicos abordados no projeto (Piovesan e Miranda, 2024).

Nesse cenário, a presente pesquisa trata das emissões de carbono em um edifício residencial típico da cidade de Brasília, de alto padrão, fornecendo dados reais importantes para a construção civil, que serão importantes para promover a redução do impacto ambiental. A análise das emissões embutidas ao longo de todo o ciclo de vida das edificações representa um passo crucial para transformar a forma como as construções impactam o meio ambiente, estabelecendo um caminho para uma construção mais eficiente e consciente. Além disso, ao abordar uma tipologia ainda pouco explorada em estudos nacionais, esta dissertação contribui para a ampliação e diversificação do banco de dados brasileiro sobre emissões de carbono na construção civil, fortalecendo a base de conhecimento necessária para o desenvolvimento de políticas públicas e diretrizes técnicas mais inclusivas e representativas da diversidade do setor.

## 1.2 OBJETIVO

O objetivo geral desta dissertação é quantificar as emissões embutidas de carbono em uma edificação residencial de alto padrão, por meio da análise de cinco componentes construtivos: fundação, estrutura, envoltória, partições internas e acabamentos internos. A investigação baseia-se tanto em dados orçamentários quanto em informações reais obtidas durante a fase de execução da obra, com coleta direta no canteiro. A análise contempla os estágios de produção dos materiais, transporte e processo construtivo, adotando a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) no escopo do berço ao canteiro de obras.

O objetivo específico deste estudo é:

- Avaliar as perdas entre obra e projeto para cada material.
- Comparar as emissões embutidas de carbono (EE) na fase de projeto, com base no orçamento e nos dados reais, obtidos no canteiro, acompanhando a obra.

## 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos, além dos elementos pré e pós-textuais, com a seguinte estrutura:

Capítulo 1 – Introdução: apresenta o contexto do estudo, destacando a relevância da construção civil no cenário das mudanças climáticas, a importância da quantificação das emissões de carbono embutido e a motivação para o uso da metodologia de Avaliação do Ciclo

de Vida (ACV). São também apresentados a justificativa, os objetivos da pesquisa e esta descrição da estrutura do trabalho.

Capítulo 2 – Revisão Sistemática da Literatura: desenvolve o referencial teórico e contextualiza a pesquisa com base em estudos prévios. Aborda as mudanças climáticas, o impacto ambiental do setor da construção civil, o conceito de carbono embutido, as normas técnicas relacionadas à ACV e a aplicação da ACV em edificações no Brasil e no exterior. Detalha ainda a metodologia utilizada para seleção bibliográfica.

Capítulo 3 – Metodologia: descreve os procedimentos metodológicos adotados, incluindo a delimitação do estudo de caso, a coleta e análise dos dados reais da obra, a caracterização da edificação estudada e o uso da ACV para mensuração das emissões de carbono. Apresenta o escopo, as fronteiras do sistema e os critérios de análise com base nas normas técnicas pertinentes.

Capítulo 4 – Resultados e Discussão: apresenta os resultados obtidos por meio da aplicação da ACV, comparando os dados de projeto com os dados reais de obra. Inclui análises gráficas e tabelas com os valores de emissões de carbono por material, elemento construtivo e estágio do ciclo de vida, discutindo os impactos e as principais discrepâncias identificadas entre o previsto e o realizado.

Capítulo 5 – Considerações Finais: reúne os principais achados da pesquisa, discute suas implicações para o setor da construção civil e para a formulação de políticas públicas, além de sugerir caminhos para pesquisas futuras sobre emissões embutidas e sustentabilidade em edificações.

## CAPÍTULO II

Referencial Teórico

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 METODOLOGIA APLICADA A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o intuito de construir e aprofundar o conhecimento deste estudo, foi apresentado o estado da arte do tema através de um portfólio bibliográfico composto pela seleção de artigos significativos à área de conhecimento. Foi utilizada a abordagem “snowball” bem como Röck *et al.* (2020) cujas abordagens consiste na conferência das referências bibliográficas existentes.

A seleção dos artigos ocorreu em quatro fases. Na primeira fase foram determinadas as Palavras-chave (PCs), sendo estes traduzidos para o inglês e as possíveis variações dentro da língua inglesa identificadas para os denominados *Wild Cards* (? , \$ , \*), que foram inseridos em cada palavra. Além de ampliarem os resultados das buscas, os Wild Cards facilitaram a formação das *Querys* de busca juntamente com os operadores *AND* e *OR*.

O **Quadro 1** mostra as PCs escolhidas, sendo estas: emissões de CO<sub>2</sub>, carbono incorporado, edificações, Avaliação do Ciclo de Vida, mitigação, estratégias e Brasil. Após identificar suas variações dentro da língua inglesa, os *Wild Cards* foram aplicados a todas as palavras que necessitaram seu uso.

Quadro 1 - Fase I - Definição das PCs e aplicação dos *Wild Cards*.

RSL: Fase I – Definição das Palavras-Chave						
Emissões de CO <sub>2</sub>	Carbono Incorporado	Edificações	Avaliação do Ciclo de Vida	Mitigação	Estratégias	Brasil
<i>CO<sub>2</sub> Emission / Emissions</i>	<i>Embodied GHG</i>	<i>Edifice / Edifices</i>	<i>Life Cycle Assessment</i>	<i>Mitigation</i>	<i>Strategy</i>	<i>Brazil</i>
<i>GHG Emission / Emissions</i>	<i>Embodied Carbon</i>	<i>Build / Building / Buildings</i>	<i>LCA</i>	<i>Mitigate</i>	<i>Strategies</i>	<i>South America</i>
<i>Carbon Emission / Emissions</i>	-	<i>Construction / Constructors</i>	-	<i>Mitigating</i>	-	-
-	-	<i>Building Process</i>	-	<i>Mitigations</i>	-	-
-	-	<i>Construction Process</i>	-	-	-	-
Aplicação dos <i>Wild Cards</i> (? , \$ , *)						
“CO <sub>2</sub> Emission\$”	“Embodied GHG”	“Edifice\$”	“Life Cycle Assessment”	“Mitigat*”	“Strateg*”	“Brazil”
“GHG Emiss\$on”	“Embodied Carbon”	“Build*”	“LCA”	-	-	“South America”
“Carbon Emiss\$on”	-	“Construct*”	-	-	-	-
-	-	“Build* Process”	-	-	-	-
-	-	“Construction Process”	-	-	-	-

No **Quadro 2** encontram-se as *Querys* de busca formadas, quatro *Querys* foram criadas utilizando os operadores *or* e *and* para combinar as palavras-chave já com os *Wild Cards*.

Quadro 2 - Fase I: Formação das *Querys* de busca utilizando os operadores *and* e *or*.

<i>Query 1</i>	("CO <sup>2</sup> Emission\$" OR "GHG Emission\$" OR "Carbon Emission\$" AND "Embodied GHG" OR "Embodied Carbon" AND "Edifice\$" OR "Build*" OR "Construct*" OR "Build* Process" OR "Construction Process").
<i>Query 2</i>	(("CO <sup>2</sup> Emission\$" OR "GHG Emission\$" OR "Carbon Emission\$" AND "Embodied GHG" OR "Embodied Carbon" AND "Edifice\$" OR "Build*" OR "Construct*" OR "Build* Process" OR "Construction Process" AND "Life Cycle Assessment" OR "LCA").
<i>Query 3</i>	(("CO <sup>2</sup> Emission\$" OR "GHG Emission\$" OR "Carbon Emission\$" AND "Embodied GHG" OR "Embodied Carbon" AND "Edifice\$" OR "Build*" OR "Construct*" OR "Build* Process" OR "Construction Process" AND "Life Cycle Assessment" OR "LCA" AND "Mitigat*" OR "Strateg*").
<i>Query 4</i>	("life cycle assessment" OR "LCA" AND "Edifice\$" OR "Build*" OR "Construct*" OR "Build* Process" OR "Construction Process" AND "brazil" OR "south america")

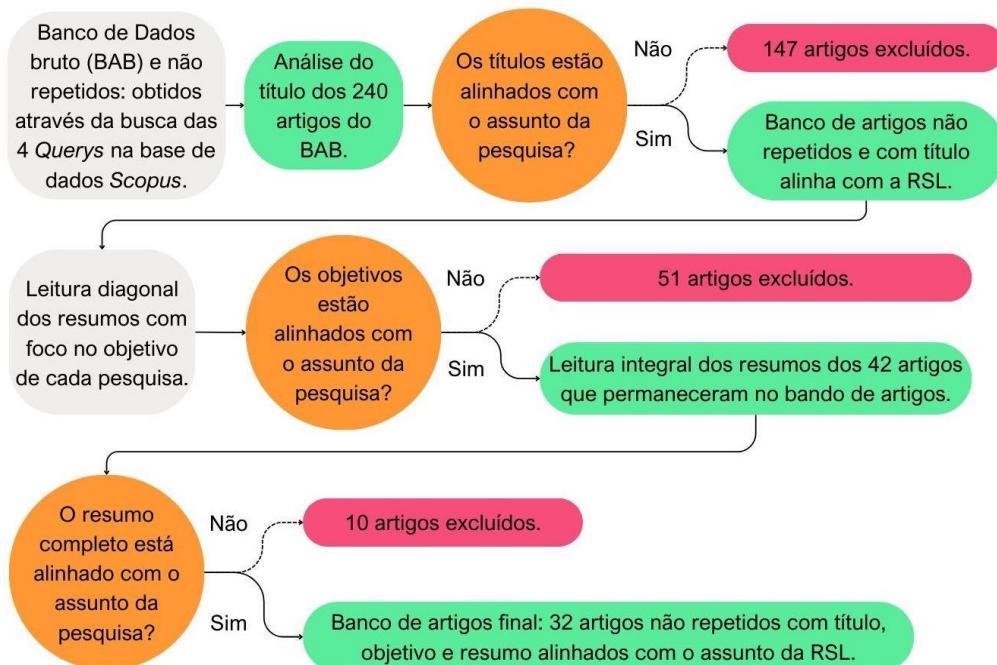
Na fase II definiu-se a Base de Dados (BD) a ser utilizada. Foi realizado um teste de aderência das quatro *Querys* de buscas criadas nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*, utilizando o acesso através da instituição de ensino, para verificar a eficiência das PCs e identificar qual base oferecia maior número de artigos conectados às áreas de interesse da pesquisa. No BD *Web of Science* foram encontrados mais de 146 mil documentos a mais que na BD *Scopus*. Isso ocorreu, pois, ao inserir a *Query 4* na BD *Web of Science* obteve-se 146.489 documentos, entretanto, a maior parte deles conectam-se a diversas áreas de conhecimentos, tais como desenvolvimento de tecnologias específicas, antropologia, geologia, engenharia de produto, bioquímica, geoengenharia, entre outras áreas que este estudo não abrange. Em muitos documentos oferecidos pela *Web of Science* apenas uma das palavras-chave foi encontrada, o que gerou resultados muito abrangentes e desconexos com esta pesquisa.

Apesar do maior número de documentos obtidos na BD *Web of Science*, optou-se por adotar a base de dados *Scopus*. Essa escolha se justifica pelo fato de que a base *Scopus* apresentou documentos com maior relevância para as áreas de interesse deste estudo, oferecendo uma boa quantidade de documentos que abrange todas as palavras-chave aplicadas nas *Querys* de busca.

Com o Banco de Dados definido, foram realizadas novas buscas com as *Querys* 1, 2, 3 e 4 com a aplicação de três filtros limitantes definidos em tipo de documento (*Document Type* – D.T) limitado a artigos, o ano de publicação (*PubYear*) entre 2019 e 2024, e documentos com acesso aberto para o acesso através da instituição universitária. As buscas foram realizadas no título, palavras-chave e resumo dos documentos na Base de Dados. Ao total foram obtidos 358 artigos, sendo 210 provenientes de *Query* 1, 83 da *Query* 2, 37 da *Query* 3 e apenas 28 artigos com a *Query* 04. Foram identificados 118 artigos duplicados, excluindo todas as duplicações obteve-se um Banco de Artigos Bruto (BAB) com 240 artigos, concluindo assim a Fase III desta RSL.

Para a seleção final dos artigos, cada documento presente no banco de artigos bruto passou por uma análise (**Figura 1**). Na primeira etapa, o título de cada artigo foi analisado, os artigos cujo título apresentou conexão com o objetivo desta RSL permaneceu no Banco de Artigos, a presença dos termos “*Life Cycle Assessment*” e “*Buildings*” nos títulos ajudaram a realizar essa primeira filtragem, bem como a presença do objeto de estudo do artigo no título. Nesse passo 147 títulos foram excluídos do banco de artigos, restando 93. A segunda etapa consistiu em realizar uma leitura diagonal do resumo dos artigos, com foco no objetivo onde foram excluídos 51 artigos. Finalizando o processo de seleção, uma leitura mais refinada foi realizada e 32 artigos permaneceram e formaram o portfólio bibliográfico desta pesquisa.

Figura 1 - Fluxograma do processo final de seleção dos artigos para leitura.



## 2.2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E O AMBIENTE CONSTRUÍDO

As mudanças climáticas representam um dos maiores desafios globais contemporâneos, com consequências ambientais, sociais e econômicas. A crescente elevação das concentrações de GEEs aceleram o aquecimento global, que se traduz em eventos climáticos extremos como incêndios florestais, secas e inundações. Esses eventos afetam as populações mais vulneráveis, especialmente aquelas que contribuíram em menor proporção para a crise climática (IPCC, 2023).

As projeções atuais indicam que, para evitar os piores impactos das mudanças climáticas, será necessário reduzir as emissões globais pela metade até 2030 e alcançar a neutralidade de carbono até meados do século. No entanto, muitos países, empresas e cidades ainda não estão suficientemente alinhados com esse objetivo, o que agrava o cenário global de emissões crescentes (Crippa *et al.*, 2023; IEA; IRENA; UN Climate Change High-level Champions, 2023; IPCC, 2023; UNEP, 2024; UNEP, 2023).

O desafio de alinhar o setor da construção e edificação às metas de neutralidade de carbono para 2050 é significativo, pois, desde 2015, as emissões cresceram, em média, 1% ao ano, superando os esforços de eficiência e descarbonização implementados até o momento. Em 2022, o setor de edificações respondeu por cerca de um terço das emissões do sistema energético global, com 26% provenientes das operações dos edifícios e 7% de emissões embutidas, associadas à produção de materiais como aço e cimento. Esses materiais, particularmente o cimento e o aço, são responsáveis por uma parte significativa das emissões incorporadas no setor de construção, representando aproximadamente 18% do total de CO<sub>2</sub> emitido (IEA; IRENA; UN Climate Change High-level Champions, 2023; UNEP, 2024).

Um dos principais desafios para a mitigação das emissões no setor da construção são as emissões incorporadas de carbono. Essas emissões referem-se ao ciclo de vida completo dos materiais de construção, desde a extração das matérias-primas até a fabricação, transporte e eventual descarte. Para que o setor de construção e edificações atinja as metas de emissões líquidas zero da Agência Internacional de Energia (IEA), é necessária uma redução de cerca de 50% nas emissões operacionais até 2030, além de uma diminuição de 25% nas emissões embutidas do aço e 20% do cimento. No entanto, o crescimento contínuo da área construída, especialmente em economias emergentes, tem aumentado as emissões totais, complicando a transição para uma infraestrutura resiliente e de baixo carbono (IEA; IRENA; UN Climate Change High-level Champions, 2023).

Além disso, a falta de progresso na redução das emissões nos últimos anos destaca a necessidade de um esforço colaborativo internacional, para harmonizar definições e avaliações do carbono ao longo do ciclo de vida das edificações. Iniciativas que visem o desenvolvimento de compromissos conjuntos, como a adoção de tecnologias de aquecimento e resfriamento limpas e eficientes, são fundamentais para a redução das emissões operacionais. Por outro lado, intensificar os estudos e o desenvolvimento de materiais e estratégias construtivas de baixo carbono são extremamente necessárias para redução das emissões incorporadas e alcance das edificações de baixo carbono. A ampliação do financiamento disponível para projetos de construção net zero e resilientes também corrobora com tal pauta (IEA; IRENA; UN Climate Change High-level Champions, 2023; IEA, 2023; Mesa; Fúquene, Maury-Ramírez, 2021).

Estrategicamente, o setor da construção precisa implementar políticas que considerem tanto as emissões operacionais quanto as embutidas, promovendo o uso de materiais sustentáveis, como concreto reciclado e madeira de fontes responsáveis, e adotando práticas inovadoras, como o design para desmontagem e a construção modular. Essas ações são essenciais para que o setor contribua de forma efetiva para a mitigação das mudanças climáticas e avance em direção a um futuro mais sustentável (IEA; IRENA; UN Climate Change High-level Champions, 2023; UNEP, 2024).

O Brasil, em resposta aos desafios das mudanças climáticas, estabeleceu a Política Nacional sobre a Mudança do Clima (PNMC) por meio da Lei nº 12.187/2009, que define um compromisso voluntário de adoção de ações de mitigação para reduzir suas emissões de gases de efeito estufa (GEEs) entre 36,1% e 38,9% em relação às emissões projetadas para 2020. Segundo o Decreto nº 9.578/2018, a projeção de emissões de GEEs para 2020 foi estimada em 3,236 Gt CO<sub>2</sub>eq, implicando que a redução correspondente aos percentuais estabelecidos para esse ano varia entre 1,168 Gt CO<sub>2</sub>eq e 1,259 Gt CO<sub>2</sub>eq (Brasil, 2009; Brasil, 2022; Ministério de Minas e Energia; EPE, 2023).

Em 2022, o Brasil emitiu aproximadamente 2,3 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>eq), representando uma queda de 8% em relação ao ano anterior. Contudo, mesmo com essa diminuição, o volume de emissões permanece elevado, colocando o Brasil entre os maiores emissores globais. Além disso, os setores de agropecuária e energia continuam a contribuir significativamente para as emissões, o que evidencia as dificuldades enfrentadas pelo país para alinhar suas ações às metas climáticas acordadas. No cenário global, o Brasil é responsável por cerca de 3% das emissões totais de GEEs (Crippa *et al.*, 2023; Observatório do Clima, 2023).

Em termos comparativos, as emissões de GEEs do Brasil em 2022 registraram uma redução de 2,4% em relação a 2021, mas houve um aumento de 2,3% quando comparadas ao nível pré-pandemia de 2019. Em comparação com 1990, as emissões de 2022 são 88,4% maiores, demonstrando um crescimento significativo nas últimas três décadas. Com uma participação de 2,4% nas emissões globais em 2022, o Brasil continua sendo o sexto maior emissor mundial, ficando atrás de China, Estados Unidos, Índia, UE27 e Rússia (Crippa *et al.*, 2023; Observatório do Clima, 2023).

Diferente de outros grandes emissores, o perfil das emissões brasileiras é dominado pelo metano ( $\text{CH}_4$ ), que representa 51,1% do total, seguido pelo dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), com 35,6%, o óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), com 12%, e os gases fluorados (F-gases), com 1,2%. As emissões per capita do Brasil, em 2022, foram de 6,05 toneladas de  $\text{CO}_2\text{eq}$  por pessoa, o que representa uma redução de 10,7% em relação à média mundial. Mesmo assim, para cumprir as metas estabelecidas pelo Acordo de Paris, o Brasil terá que adotar medidas ainda mais ambiciosas, tanto no que se refere à redução do desmatamento quanto ao controle das emissões nos setores críticos, como a agropecuária, energia e os processos industriais (Crippa *et al.*, 2023; Brasil, 2022; Observatório do Clima, 2023).

O setor de Indústria de Produtos e Processos Urbanos (IPPU) brasileiro teve um papel significativo nas emissões de GEEs, sendo responsável por 78 milhões de toneladas de  $\text{CO}_2\text{eq}$  em 2022, o que corresponde a 3% das emissões totais do país. Este setor apresentou um aumento de 8,8% nas emissões em comparação a 2016, especialmente devido ao crescimento das emissões da produção metalúrgica e da fabricação de cimento, que representa uma parte crítica das emissões do IPPU. Em 2020, as emissões do IPPU totalizaram 101.936 Gt  $\text{CO}_2\text{eq}$ , correspondendo a 6,1% das emissões nacionais. Os subsetores mais emissivos incluíram a indústria metalúrgica, que respondeu por 52,1% das emissões do IPPU, e a produção de cimento, com 22,7%. A fabricação de cimento é um dos principais responsáveis pelas emissões do setor, contribuindo com grandes volumes de  $\text{CO}_2$  e devido à transformação química necessária no processo produtivo (Ministério de Minas e Energia; EPE, 2023; Observatório do Clima, 2023).

No que diz respeito ao setor de edificações, este segmento, que integra o setor energético, emitiu cerca de 40 milhões de toneladas de  $\text{CO}_2\text{eq}$  em 2022, correspondendo a 8% das emissões combinadas dos setores de energia e processos industriais. A redução das emissões no setor de edificações está diretamente relacionada ao aumento do uso de fontes renováveis, especialmente energia solar e eólica, que têm sido incentivadas no Brasil.

Contudo, o crescimento contínuo da demanda por energia no setor de construção pode limitar a capacidade do país de manter a trajetória de redução de emissões, a menos que sejam adotadas medidas em outros ambitos, como a utilização de materiais construtivos de baixo carbono e tecnicas contrutivas de menor impacto ambiental. Assim, os setores de processos industriais e edificações são essenciais para que o Brasil alinhe suas emissões com os compromissos do Acordo de Paris, necessitando de políticas que favoreçam o uso de tecnologias mais limpas e práticas de produção e construção que minimizem o impacto climático (Observatório do Clima, 2023; Bianchi *et al.*, 2021)

Sob a ótica das emissões embutidas, a demanda por materiais de construção no Brasil é substancial. O Ministério do Meio Ambiente aponta que mais de 50% dos resíduos sólidos gerados pelas atividades humanas no Brasil têm origem na construção civil. Em 2021, o Brasil gerou aproximadamente 48 milhões de toneladas de resíduos provenientes da construção e demolição, o que corresponde a cerca de 30% do total de resíduos gerados no país, uma média de 227 quilos de materiais de entulho por habitante. Isso reflete a alta demanda por materiais construtivos no âmbito brasileiro, especialmente no contexto de novos projetos e reabilitação de edificações (CBIC; SENAI, 2022; Bettini Comunicação, 2024).

Essa inter-relação entre o crescimento da construção civil e os compromissos ambientais enfatiza a importância estratégica do setor como um ator crucial na transição para uma economia de baixo carbono. Embora o setor tenha enfrentado desafios consideráveis relacionados à descarbonização, especialmente devido ao uso de materiais com altas emissões, alternativas como tecnologias de baixo carbono, melhorias na eficiência energética e a substituição de fontes fósseis por biomateriais e biogás, têm se mostrado promissoras. Entretanto, o aumento das emissões embutidas nos materiais e processos construtivos, especialmente durante a produção dos edifícios, tem sido uma preocupação global (Crippa *et al.*, 2023; Pomponi, Moncaster, 2016; Röck *et al.*, 2020; Instituto Talanoa, 2023).

Nesse contexto, pesquisas que ofereçam resultados aplicáveis ao setor de construção civil, aos projetistas e aos formuladores de políticas públicas são fundamentais. Principalmente em temáticas que ainda carregam lacunas, questionamentos e grande potencial para contribuir com a redução das emissões. A fase de construção das edificações, as emissões associadas ao transporte e aos materiais construtivos, bem como análises mais realistas com dados reais e não apenas de projeto são bons exemplos (Bahramian ; Yetilmezsoy, 2020; Huang *et al.*, 2019; Iyer *et al.*, 2023).

## 2.3 ABORDAGEM DE CICLO DE VIDA NA AVALIAÇÃO DE EDIFICAÇÕES

Segundo Buyle *et al.* (2013), a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) começou a ser aplicada no setor da construção na década de 1980, com um foco inicial em recursos renováveis. No entanto, naquela época, não existiam métodos estabelecidos para a realização dessas avaliações. A Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental (*Society of environmental Toxicology and Chemistry – SETAC*) foi responsável pela padronização da metodologia de ACV em 1990.

Em 1997, a Organização Internacional para Padronização (ISO) desenvolveu uma série de normas que estabeleceram um quadro metodológico para a ACV. Com a implementação dessas normas, tornou-se possível comparar de forma consistente os estudos de ACV, promovendo uma abordagem mais padronizada e confiável nas análises de impacto ambiental (Brugnera, 2018).

No começo do século 21, o interesse na ACV cresceu consideravelmente, passando a integrar políticas da União Europeia, como a Política Integrada ao Produto (IPP). Esse desenvolvimento resultou na elaboração do Manual do ILCD (*International Reference Life Cycle Data System Handbook*), que oferece diretrizes práticas para a aplicação da ACV. Azari (2016) destaca a progressiva popularidade da metodologia de ACV como meio de analisar de que maneira a construção de edificações, a fabricação de seus componentes e o seu funcionamento afetam o meio ambiente, dentro de diversas categorias de impactos negativos ao longo de seus ciclos de vida.

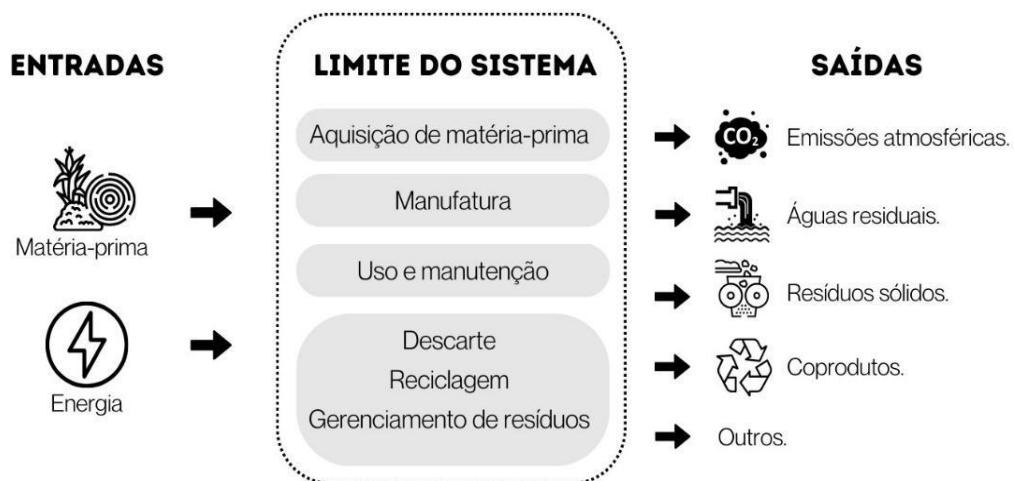
O aumento do interesse na ACV também se reflete na criação das Declarações Ambientais de Produto (DAP), em inglês *Environmental Product Declaration (EPD)*, que fornecem informações detalhadas sobre o impacto ambiental de produtos específicos, muitas vezes baseadas em estudos de ACV. A importância da ACV foi reconhecida em várias normas e diretrizes, com o Comitê Técnico de Normalização CEN (TC) 350 adotando modelos de avaliação para edificações, tanto novas quanto existentes, que consideram aspectos econômicos, sociais e ambientais, além de integrar as EPDs dos materiais utilizados na construção civil (Buyle *et al.*, 2013).

No Brasil a plataforma SIDAC (Sistema de Informação para Declarações Ambientais de Produtos) foi desenvolvida para centralizar e facilitar o acesso às DAPs. Essa plataforma, que baseia sua metodologia na ISO 14025 e na ISO 14040, busca garantir a transparência e a uniformidade das informações ambientais fornecidas por fabricantes e fornecedores.

A ACV é internacionalmente padronizada pela ISO 14040 e 14044, que descrevem o método para avaliação do impacto ambiental de produtos. No Brasil a NBR ISO 14040:2009 estabelece os princípios e a estrutura para a realização da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de materiais e produtos. Já a norma europeia EN 15978:2011 especifica os métodos e requisitos para a avaliação do desempenho ambiental de edifícios, fornecendo uma estrutura detalhada para a realização de ACV no setor da construção (BSI Standards Publication, 2011; ABNT, 2009, 2014).

Deste modo, a ACV é o método mais consolidado e reconhecido para avaliar o desempenho ambiental de um edifício. Sua metodologia permite analisar todas as etapas do ciclo de vida de um produto, começando com a extração de matérias-primas, passando pela produção de energia e materiais, fabricação, uso, até o fim de vida e descarte final, como ilustrado na **Figura 2**.

Figura 2 - Entradas e saídas do ciclo de vida.



Fonte: adaptado de EPA (2006).

Para a condução de uma ACV é crucial entender e delimitar as fronteiras abordadas no estudo. Essa abordagem pode ser completa, do “berço ao berço”, quando se trata de sistema que adota reciclagem ou reutilização, do “berço ao túmulo”, indo da extração da matéria-prima a destinação final, do “berço ao portão”, abrangendo da extração ao processo de fabricação do material, ou do “portão ao portão”, referente ao processo interno da indústria (Caldas *et al.*, 2016).

A ACV é uma metodologia que permite a avaliação de diversas categorias de impacto ambiental, incluindo mudança climática, também conhecida como Potencial de Aquecimento

Global (PAG), a acidificação, eutrofização, depleção de recursos, toxicidade para humanos e ecossistemas, uso de água e geração de resíduos.

A categoria mudança climática avalia o potencial de emissão de gases de efeito estufa, enquanto a acidificação e a eutrofização medem os impactos na acidificação dos ecossistemas e o excesso de nutrientes em corpos d'água, respectivamente. A depleção de recursos analisa o uso e a exaustão de recursos naturais, e a toxicidade para humanos e ecossistemas examina os efeitos prejudiciais das substâncias químicas. Além disso, o uso de água quantifica o consumo hídrico, e a geração de resíduos considera a quantidade e o tipo de resíduos produzidos e suas implicações ambientais.

A aplicação da metodologia ACV no meio científico permeia por várias possibilidades. Através da ACV, Dani *et al.* (2022) puderam comparar as emissões de carbono advindas de duas edificações residenciais na Nova Zelândia. Hawkins *et al.* (2021) conseguiram comparar o carbono incorporado de edifícios com a estrutura em concreto, aço e madeira. Röck *et al.*, (2020) investigaram as tendências globais das emissões de gases de efeito estufa (GEE) ao longo do ciclo de vida dos edifícios, analisando sistematicamente mais de 650 estudos de caso de ACV. Para investigar a influência do aumento do uso de eletricidade renovável na produção de materiais de construção e examinar as tendências futuras nos processos de fabricação, Alaux *et al.* (2023) utilizaram a metodologia ACV aplicada a seis variações de design de dois estudos de caso de edifícios.

No âmbito científico brasileiro, Brugnera (2018) utilizou a ACV para quantificar e compreender potenciais impactos ambientais advindos da energia e incorporados nos materiais. Faria (2023) buscou avaliar as emissões embutidas de GEEs em edificações residenciais típicas de Brasília. Costa e Kos (2021) analisaram o ciclo de vida energético de uma residência em Belém com o uso da ACV. Já Bianchi *et al.* (2021) buscaram encontrar alternativas de design sustentável para uma residência brasileira utilizando a ACV. Caldas *et al.* (2020), a partir da ACV, apresentaram um framework para o impacto das mudanças climáticas ao longo do ciclo de vida dos edifícios. Silva *et al.* (2024) realizaram um comparativo das emissões embutidas da fundação e estrutura de uma edificação residencial típica de Brasília.

Apesar de sua ampla utilização em diversos estudos pelo mundo, no contexto brasileiro a aplicação da ACV enfrenta desafios significativos. Iyer *et al.* (2023) destacam, em sua revisão, a falta de estudos brasileiros com a aplicação da ACV em edificações. Segundo os autores, o

Brasil possuía cerca de 10 a 50 estudos, a China variava entre 100 e 150, enquanto os Estados Unidos eram foco de mais de 400 pesquisas acerca do tema.

Conforme destacado por Costa e Kos (2021), a falta de uniformidade metodológica como um dos principais obstáculos, que se agrava pela escassez de dados nacionais sobre materiais de construção civil. A ausência de uma base de dados padronizada e completa para o setor é um fator crítico que impede a adoção de práticas mais sustentáveis. Essas lacunas na informação dificultam análises consistentes e comparativas comprometendo a eficácia da ACV como uma ferramenta de avaliação ambiental.

Apesar da relevância da ACV para avaliar impactos ambientais e alinhar estratégias com as metas da agenda climática, sua implementação no setor da construção civil no Brasil é prejudicada pela falta de cooperação dos agentes do setor em fornecer dados precisos. A dificuldade de acesso a informações sobre a quantidade e a descrição dos materiais utilizados nas construções impedem a obtenção resultados que possam corroborar com a evolução das normativas brasileiras e possíveis benchmarks. Esses fatores nos levam a compreender a falta de estudos alimentados com dados realistas, originários dos canteiros de obras, por exemplo.

Diante do exposto, o presente estudo demonstra como a integração das empresas do setor com o meio acadêmico científico pode ser valiosa, uma vez que foi essa integração que possibilitou a produção de um estudo alimentado por dados reais da construção de uma edificação. Essa é uma oportunidade de compreender as emissões de GEEs do ambiente construído, incentivar a integração no setor da indústria e construção e clarear a aplicação da metodologia ACV aos estudos do carbono embutido em edifícios.

## **2.4 ABNT NBR ISO 14040:2014 – GESTÃO AMBIENTAL – PRINCÍPIOS E ESTRUTURA**

A ABNT NBR ISO 14040 (2014) é uma norma técnica brasileira que estabelece os princípios e a estrutura metodológica para a condução da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de produtos e serviços. Desenvolvida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), esta norma é baseada na ISO 14040:2006, alinhando-se às diretrizes internacionais para a condução de ACVs. A metodologia ACV é uma abordagem que considera o ciclo de vida completo de um produto, desde a extração da matéria-prima, passando pela fabricação, a distribuição, o uso, até o descarte final ou reciclagem.

A condução da ACV, conforme a NBR 14040:2014, envolve quatro fases principais: definição de objetivo e escopo, análise do inventário do ciclo de vida (ICV), avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) e interpretação dos resultados. Inicialmente, define-se o objetivo do estudo e o escopo, incluindo os limites do sistema e os critérios de avaliação. Em seguida, realiza-se a análise do inventário, coletando dados sobre os fluxos de materiais, energia e resíduos. Na fase de avaliação de impacto, esses dados são analisados para quantificar os impactos ambientais potenciais em diversas categorias, como mudança climática e outras citadas anteriormente. Finalmente, na interpretação, os resultados são analisados e comparados com benchmarks e outros estudos, para então identificar oportunidades de melhoria, fornecer recomendações e possíveis estratégias, garantindo a credibilidade do estudo.

Além disso, a NBR 14040:2014 enfatiza a importância da transparência, consistência e clareza ao conduzir estudos de ACV. A norma recomenda uma documentação detalhada de todas as fases do processo, a identificação nítida dos critérios utilizados e a comunicação acessível e transparente dos resultados. Essa abordagem sistemática visa garantir a confiabilidade e a replicabilidade dos estudos de ACV, promovendo a avaliação abrangente dos aspectos ambientais e dos impactos potenciais ao longo do ciclo de vida de um produto.

A aplicação da NBR 14040:2014 é ampla, abrangendo diferentes setores industriais e tipos de produtos. No contexto das edificações, por exemplo, a ACV pode ser usada para avaliar os impactos ambientais de materiais de construção, processos de construção, operação do edifício e sua demolição, contribuindo para a formação de legislações, normativas, benchmarks e práticas de construção mais sustentáveis, além de decisões conscientes em projetos arquitetônicos e de engenharia.

Contudo, embora a NBR 14040 forneça a estrutura geral, a aplicação prática da ACV para edificações pode ser desafiadora devido à complexidade dos dados e à necessidade de integrar informações detalhadas sobre materiais e processos específicos (Fnais *et al.*, 2022). Portanto, a norma serve como base para a realização de estudos detalhados, mas a efetiva aplicação no setor da construção civil pode exigir a utilização de normas complementares e ferramentas específicas para lidar com as particularidades do ciclo de vida das edificações, tais como as normativas europeias EN 15798 e a EN 15809.

## 2.5 EN 1598:2011 – AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL DE EDIFICAÇÕES

A norma europeia EN 15978 de 2011, *Sustainability of construction works — Assessment of environmental performance of buildings — Calculation method*, estabelece diretrizes fundamentais para a avaliação da performance ambiental de edificações, com uma abordagem integral que abrange todos os estágios do ciclo de vida de um edifício. Essa norma se fundamenta para aplicação da metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida em novas construções e edificações existentes.

Ao incorporar todos os aspectos envolvidos no ciclo de vida dos edifícios — desde a extração de matérias-primas até a demolição e descarte de materiais — essa normativa promove uma análise holística que permite identificar oportunidades de melhoria em termos de sustentabilidade e eficiência. Esta abordagem é crucial para a implementação de práticas sustentáveis no setor da construção civil, alinhando-se às exigências contemporâneas de redução de impactos ambientais, além de contribuir para a conformidade com regulamentações e metas ambientais cada vez mais rigorosas.

A realização da ACV segundo a EN 15978:2011 inicia-se com a definição do escopo, uma etapa essencial que deve ser conduzida com rigor. Nesta fase, a descrição da edificação deve ser minuciosa, abrangendo não apenas as características físicas e funcionais do edifício, mas também suas interações com o ambiente e a comunidade ao seu redor. É fundamental delimitar os limites do sistema a serem considerados, englobando os diversos estágios do ciclo de vida do edifício.

Os estágios vão desde a produção dos materiais (A1–A3), onde são considerados os impactos relacionados à extração e processamento de matérias-primas, até a construção (A4–A5), onde a logística e a implementação das obras podem influenciar significativamente a performance ambiental. O estágio de uso (B1–B7) engloba a operação do edifício, a manutenção, os reparos e substituição de materiais e o consumo de energia e água. Já o estágio de fim de vida (C1–C4) e beneficiamento (D), tratam dos processos de desmantelamento, transporte e descarte de materiais, recuperação e reciclagem. Todos esses estágios estão elucidados na **Figura 3**.

Figura 3 - Estágios do ciclo de vida de uma edificação.

CICLO DE VIDA DA EDIFICAÇÃO														Informações Adicionais	
Pré-uso			Uso							Pós-uso					
Estágio de Produto			Estágio de Construção		Estágio de Uso e Manutenção							Estágio de Fim de Vida		Estágio de Beneficiamento	
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4
Extração matéria prima	Transporte	Fabricação	Transporte	Processo construtivo	Uso	Mantenção	Reparo	Substituição dos materiais	Reformas	Uso de energia	Uso de água	Demolição	Transporte	Processamento de resíduos	Disposição final
Impacto Incorporado	Impacto Incorporado	Impacto Incorporado	Impacto Incorporado	Impacto Incorporado	Impacto Incorporado	Impacto Incorporado	Impacto Incorporado	Impacto Incorporado	Impacto Operacional	Impacto Incorporado	Impacto Incorporado	Impacto Incorporado e Operacional	D	Recuperação Reuso Reciclagem	

Fonte: A autora, adaptado de EN 15978 (2011).

Além de definir claramente os limites do sistema, a norma EN 15978:2011 orienta sobre o procedimento de análise dos resultados do inventário. Nessa fase, são listados os indicadores relevantes que permitem quantificar os impactos ambientais e estabelecer metodologias de cálculo que promovem uma avaliação consistente e confiável. Esses indicadores podem incluir, entre outros, o potencial de aquecimento global, a acidificação, a eutrofização e o consumo de recursos naturais. A norma também enfatiza a necessidade de transparência e documentação rigorosa em todas as etapas do processo de avaliação, garantindo que os dados utilizados sejam válidos e que os métodos de cálculo sejam claramente definidos. Essa documentação não apenas apoia a credibilidade dos resultados, mas também fornece um recurso valioso para futuras análises e comparações.

A aplicação da norma EN 15978:2011 não se limita a fornecer bases para análises ambientais rigorosas, mas também se estende à promoção de edificações mais sustentáveis, que atendem às necessidades sociais, econômicas e ambientais contemporâneas.

No contexto brasileiro, por ainda no país uma normativa de ACV voltada exclusivamente para edificações, a integração dessa normativa com a NBR 14040 pode ser um importante catalisador para a inovação na construção civil no país. Estimulando a adoção de materiais e processos que minimizem os impactos ambientais, assim como encorajando a adoção de tecnologias emergentes e práticas de design sustentáveis.

## 2.6 EMISSÕES EMBUTIDAS DE CARBONO

As emissões embutidas de carbono, também conhecidas como carbono embutido, referem-se ao CO<sub>2</sub> e a outros gases de efeito estufa liberados ao longo de todo o ciclo de vida de uma edificação. Esse ciclo abrange estágios cruciais do ciclo de vida da edificação, sendo o estágio de produto (A1-A3), estágio de construção (A4-A5), os módulos manutenção (B2), reparo (B3), substituição dos materiais (B4) e reformas (B5) do estágio de uso e o estágio de fim de vida (C1-C4) (**Figura 3**).

Essas emissões ocorrem antes do uso efetivo do edifício e têm se tornado cada vez mais relevantes no impacto ambiental das construções, especialmente para materiais que consomem grandes quantidades de carbono, como cimento e aço. Já as emissões operacionais são aquelas geradas durante o uso da edificação, predominantemente pelo consumo de energia para aquecimento, resfriamento, iluminação e operação de equipamentos. À medida que avançamos em direção à eficiência energética e à transição para fontes de energia mais limpas, as emissões operacionais tenderam a diminuir. Isso torna as emissões embutidas uma parte cada vez mais significativa das emissões totais das edificações (Cabeza *et al.*, 2022; Material Economics, 2019; UNEP, 2023; UNEP, 2024).

Com cerca de 40% das emissões globais relacionadas ao consumo de energia, o setor de construção gera emissões consideráveis de GEEs, principalmente durante a fabricação, transporte de materiais, montagem e demolição. Esta parcela de carbono embutido (CE), diferentemente do carbono operacional (CO) relacionado ao uso do edifício, exige grandes esforços e estratégias multidisciplinares de mitigação, uma vez que se inter-relacionam com a indústria de materiais, transporte e processos construção, além de englobar diversos profissionais da área (Alotaibi *et al.*, 2022; Giordano; Gallina; Quaglio, 2021).

Em 2019, as emissões totais de CO<sub>2</sub> provenientes do setor de construção foram estimadas em 12 GtCO<sub>2</sub>-eq, representando 21% das emissões globais. Dentro desse total, as emissões embutidas, geradas principalmente pela produção de materiais como cimento e aço, representaram 18%. As emissões diretas, resultantes da queima de combustíveis no local, corresponderam a 24%, enquanto as emissões indiretas, associadas à geração de eletricidade e calor fora do local, alcançaram 57% (Cabeza *et al.*, 2022).

Já em 2022, o setor de edificações e construção foi responsável por 37% das emissões globais de CO<sub>2</sub>, abrangendo tanto as emissões operacionais quanto aquelas relacionadas a processos, totalizando quase 10 Gt de CO<sub>2</sub>. A produção de materiais de construção, como

cimento, aço e alumínio, contribuiu com cerca de 2,5 Gt de CO<sub>2</sub>, enquanto a fabricação de tijolos e vidro adicionou aproximadamente 1,2 Gt de CO<sub>2</sub>, evidenciando a relevância das emissões embutidas nesses materiais específicos (UNEP, 2024). Focar apenas nas emissões operacionais tornou-se insuficiente para a construção de um setor de baixo carbono, pois as emissões embutidas representam uma fração significativa da pegada de carbono das edificações (WBCSD; ARUP, 2023; World Green Building Council, 2019). Esse aumento das emissões embutidas é impulsionado pela demanda por novos edifícios e reformas, especialmente em países em desenvolvimento, onde a urbanização se intensifica rapidamente (UNEP; GlobalABC, 2022).

O uso de metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tem sido um meio eficaz para quantificar o impacto ambiental de edificações em diferentes estágios de seu ciclo de vida, e atualmente diversos pesquisadores têm explorado e analisados as EE de diversas edificações através dessa metodologia (Giordano; Gallina; Quaglio, 2021).

Lützkendorf e Balouktsi (2022) afirmam que a proporção das EE no ciclo de vida das edificações pode representar em média 50% para edifícios novos e energeticamente eficientes. Röck *et al.* (2020) relata que está sim ocorrendo um aumento das EEs, explica que as EEs em edificações que seguem as atuais normativas de desempenho energético oscilam entre 20 e 25%, mas que esse valor escalona para 40 a 45% no caso de edifícios de alta performance energética. Os autores também destacam que o pico de carbono ocorre nos primeiros anos de construção da edificação, a variação dessa emissão inicial de GEE para edifícios novos (padrão ou avançado) está entre 103 a 423 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> e pode ultrapassar 1250 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> em casos extremos.

Shi *et al.* (2023) compararam o impacto ambiental das emissões de carbono de edificações residenciais na China, Finlândia e Estados Unidos. O estudo abrangeu do estágio de produto até o fim de vida das edificações, um dos poucos estudos desta revisão a realizar tal análise. Ademais, também incluiu mais elementos da edificação que outras pesquisas, fundação, estrutura vertical e horizontal, janelas e portas, isolamento, impermeabilização, acabamento e revestimento, além de outras estruturas e materiais foram analisados. Entretanto, o estudo limitou-se apenas a dados de projeto, diferente do proposto na presente pesquisa, que também alimentou seu inventário com dados reais do consumo de materiais coletados diretamente do canteiro de obras.

O estudo conduzido por Alaux *et al.* (2023) investigou, através da ACV, a influência da maior utilização de energia renovável na produção de materiais de construção. Os autores constataram que sem medidas de mitigação, as emissões embutidas representam até 44% das emissões totais de novas construções residenciais ao longo de 30 anos. Já em um cenário com tecnologias futuras, como captura e armazenamento de carbono (CCS) e bionergia, essas EE podem ser reduzidas em até 19% em um cenário otimista até 2050, destacando o potencial de mitigação das EE.

As tendências na mitigação do carbono embutido incluem o aumento do uso de materiais reciclados e de baixo carbono, estratégias de otimização na construção e o incentivo à reutilização de materiais, como o concreto e o aço reciclado, que demonstraram ser eficazes para reduzir as emissões de carbono em cerca de 10 a 30%. Além disso, as diretrizes internacionais, como a ISO 21931 e EN 15978, propõem o uso de inventários de materiais específicos de cada país para facilitar a avaliação das emissões de acordo com as condições locais de produção e energia, possibilitando uma maior precisão na avaliação das emissões embutidas (Alotaibi *et al.*, 2022).

Comparações entre diferentes materiais de construção revelam variações expressivas nas emissões de GEE associadas a cada um deles. Em uma análise conduzida por Huang *et al.* (2019), constatou-se que o concreto, os tijolos e o cimento são os materiais mais utilizados e, ao mesmo tempo, intensivos em emissões, devido ao alto consumo energético em seus processos de produção. Chen *et al.* (2022) compararam construções realizadas com madeira laminada cruzada (CLT) e concreto, e descobriram que o potencial de aquecimento global (GWP) das edificações em CLT era 25% inferior ao das construções em concreto. No entanto, edificações em CLT apresentaram outros impactos ambientais, como uma maior acidificação e esgotamento de combustíveis fósseis, especialmente devido ao transporte dos materiais a longas distâncias. Essas comparações ressaltam a necessidade de uma análise holística na escolha dos materiais, levando em consideração diversos aspectos ambientais para minimizar efeitos adversos e alinhar-se às metas globais de sustentabilidade (Jamaludin e Li, 2023).

Diante do apresentado, a redução das emissões embutidas de carbono nas edificações é essencial para promover a sustentabilidade no setor da construção e cumprir as metas globais de neutralidade de carbono. Para tanto, é essencial a criação de normas e regulamentações específicas para as emissões embutidas, bem como a adoção de estratégias como a transição para uma economia circular, a seleção de materiais de baixo carbono e o design para desmontagem.

Além disso, implementar abordagens dinâmicas de ACV e desenvolver políticas públicas robustas que incentivem a sustentabilidade é crucial, especialmente em áreas de urbanização acelerada. Priorizar essas práticas nas fases iniciais de planejamento permite que o setor minimize seu impacto climático e avance em direção a um ambiente construído resiliente e sustentável, alinhado aos ODS. A transição para edificações de baixo carbono requer, portanto, uma abordagem ampla e colaborativa, englobando a escolha criteriosa de materiais, o desenvolvimento de normas, o uso de ferramentas acessíveis e o treinamento adequado de profissionais, elementos indispensáveis para que a construção contribua efetivamente na mitigação das mudanças climáticas.

Apesar da existência de diversos estudos que contemplam essa temática, ainda persistem lacunas significativas na regulação e análise de emissões embutidas que freiam esse avanço necessário. O método de ACV, embora amplamente utilizado, apresenta variação nos resultados devido à inconsistência nas fontes de dados, muitas vezes originários apenas do projeto executivo, e exclusão de partes da edificação, subestimando assim as emissões totais.

## 2.7 EDIFICAÇÃO DE BAIXO CARBONO

A urgência em mitigar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) no setor de construção tem impulsionado a adoção de estratégias para edificações de baixo carbono, essenciais para atender às metas globais de descarbonização até 2060. A descarbonização do setor exige uma colaboração global que promova o desenvolvimento de tecnologias para a produção de materiais mais sustentáveis e o uso de biomateriais regenerativos e circulares, provenientes de resíduos florestais e agrícolas. O uso de materiais biológicos e o armazenamento de carbono em elementos construtivos podem não apenas reduzir emissões, mas também promover uma transição justa e inclusiva para o setor (United Nations Environment Programme, 2023).

Um edifício de baixo carbono é projetado para minimizar as emissões de gases de efeito estufa em todas as fases de seu ciclo de vida, incluindo produção de materiais, construção, operação e descarte. Essas edificações priorizam a redução do carbono embutido por meio de escolhas de materiais sustentáveis e práticas de construção eficientes, além de otimizar o carbono operacional ao utilizar sistemas altamente eficientes e energia proveniente de fontes renováveis. Adicionalmente, adotam estratégias para armazenamento de carbono biogênico,

utilizando materiais como madeira e outros *bio-based*, enquanto compensam emissões residuais inevitáveis com remoção ou neutralização verificadas (LCBI, 2024; Burrows; Black, 2021)

Segundo Chan, Masrom e Yasin (2022), uma das principais estratégias para a redução das emissões é o uso de materiais de construção de baixo carbono. Contudo, este movimento enfrenta barreiras, como a falta de regulamentação e o desconhecimento sobre a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que quantifica o consumo de energia e recursos desde a extração dos materiais até o descarte final. A ACV é uma ferramenta crucial para o setor, possibilitando a análise e redução das emissões ao longo do ciclo de vida das edificações. No entanto, a aplicação efetiva desse método requer a implementação de regulamentações claras e o compartilhamento de conhecimento técnico entre profissionais do setor (LETI, 2020).

O estudo realizado por Carcassi *et al.* (2022) destaca o impacto das emissões embutidas de GEE, indicando que construções eficientes em energia geram de 45% a 50% de suas emissões totais devido às emissões embutidas, uma porcentagem significativamente maior que as construções convencionais. Esse pico de carbono ocorre nas fases iniciais do ciclo de vida dos edifícios, o que representa um desafio urgente para a descarbonização (UNEP, 2023). O estudo sugere dietas de materiais que incluem concreto, madeira e bambu, classificados entre materiais positivos em carbono (como concreto) e negativos em carbono (como palha e cânhamo). Esses materiais biológicos, devido ao seu potencial de aquecimento global (PAG) negativo, podem compensar as emissões de materiais intensivos em carbono, promovendo a neutralidade de carbono.

A substituição de materiais tradicionais, de alta emissão de GEE, por alternativas biológicas oferece benefícios adicionais, como a valorização de subprodutos agrícolas e a redução da dependência de recursos não renováveis (Carcassi *et al.*, 2022). Essa abordagem promove uma economia circular no setor de construção, incentivando a reutilização e reciclagem de materiais e reduzindo significativamente as emissões. Além disso, segundo a *London Energy Transformation Initiative* (LETI), práticas como o design para desmontagem e o uso de materiais reciclados são essenciais para edificações neutras em carbono. LETI enfatiza que reduzir o carbono incorporado em construções envolve desde o planejamento de baixa energia até a colaboração entre partes interessadas para que as construções se alinhem com as metas climáticas (LETI, 2020).

Em relação às métricas para edificações de baixo carbono, alguns estudos apresentam limites claros para as emissões ao longo do ciclo de vida. O *Low Carbon Building Initiative* –

LCBI (2024) estabelece como referência para carbono embutido valores de até 1000 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> (nível básico) e 700 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> (nível exemplar) em 50 anos, incentivando projetos com análises completas. Já Burrows e Black (2021), no relatório *WorldGBC Net Zero Carbon Buildings Commitment*, recomendam uma redução mínima de 40% no carbono embutido em novos edifícios até 2030, com foco no carbono *upfront* (emissões de produção e construção), além da neutralização de emissões residuais com remoção de carbono. O LETI *Climate Emergency Design Guide* (2020b) também estabelece métricas para edificações de baixo carbono, com metas de carbono incorporado limitadas a 500-600 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, variando conforme o tipo de edifício e abrangendo desde a extração de materiais até a demolição, focando na redução de 40% nas emissões.

No Brasil, o Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC) iniciou em 2023 o Grupo de Trabalho do Plano Setorial de Mitigação de Gases de Efeito Estufa (GEE) durante reunião do Comitê Técnico da Indústria de Baixo Carbono (CTIBC). Coordenado pela Secretaria de Economia Verde, Descarbonização e Bioindústria (SEV), o GT tem como objetivo debater e estabelecer metas de descarbonização da indústria, alinhadas aos compromissos firmados pelo Brasil no Acordo de Paris (MDIC, 2024).

Esse grupo de trabalho conta com a participação da Confederação Nacional da Indústria (CNI), das Federações das Indústrias dos Estados de São Paulo (Fiesp) e Minas Gerais (Fiemg), além de representantes dos seis setores industriais que mais emitem gases: cimento, papel e celulose, alumínio, aço, química e vidro. Atualmente, a indústria é responsável por 6% do total de GEE emitidos pelo Brasil, dos quais 85% provêm dos setores envolvidos (MDIC, 2024).

Essa ação está integrada a uma iniciativa mais ampla, com o Brasil demonstrando compromissos para promover a descarbonização nos setores industrial e de construção, especialmente ao aderir à Industrial Deep Decarbonization Initiative (IDDI), promovida pelo World Economic Forum. Essa iniciativa busca reduzir as emissões de setores pesados, como cimento, aço e petroquímica, por meio do desenvolvimento de tecnologias inovadoras e políticas que incentivem o uso de materiais sustentáveis. Para o Brasil, a adesão à IDDI representa uma oportunidade de fortalecer sua base industrial, conciliando crescimento econômico com sustentabilidade ambiental e justiça social (Greene-Dewasmes, 2023).

Os resultados do grupo serão apresentados ao Ministério de Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA), responsável pela elaboração do Plano Clima, até novembro. Este documento orientador tem a finalidade de manter o ritmo de redução do desmatamento e facilitar a transição

para uma economia de baixo carbono rumo à neutralidade climática, com publicação prevista para 2025.

Além disso, a participação do Brasil na IDDI reflete a necessidade de transformar os setores de construção e materiais, áreas que ainda representam um grande volume de emissões de carbono. A IDDI apoia o país na implementação de tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS) e na promoção de práticas de economia circular, como o uso de biomateriais e resíduos agrícolas na fabricação de materiais de construção. Essas ações não apenas reduzem a intensidade de carbono, mas também valorizam recursos locais, fortalecendo a bioeconomia e promovendo uma transição energética justa (Greene-Dewasmes, 2023).

Em um contexto geral, a transição para uma construção de baixo carbono depende de múltiplos fatores, como a adaptação tecnológica, regulamentações adequadas e conscientização dos profissionais sobre os impactos ambientais dos materiais. A escolha de materiais sustentáveis e a aplicação de metodologias como a ACV são passos fundamentais para aproximar o setor de construção das metas de descarbonização estipuladas pelo Acordo de Paris (Carcassi *et al.*, 2022; Chan; Masrom; Yasin, 2022; UNEP, 2023; UNEP, 2024).

Ciente do contexto apresentado, este estudo contribui para comparar as diferenças dos resultados obtidos com dados de projeto e dados reais de obra, permitindo entender essa variação em relação às emissões. Corrobora também por trazer uma análise mais realista uma vez que quantifica o consumo efetivo dos materiais no canteiro de obras. Ademais, abrange 5 elementos da edificação, o que possibilita uma visualização ampla das EE da edificação completa.

## CAPÍTULO III

Materiais e métodos | Estudo de Caso | Inventário do Ciclo de Vida

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia de ACV vem sendo amplamente utilizada pelo setor da construção, com aplicação em diversos estudos que investigam o perfil ambiental das edificações em busca de soluções para mitigar e controlar os impactos ao longo do ciclo de vida das edificações (Chan, Masrom e Yasin, 2022).

Para realizar uma análise do berço ao canteiro de obras das emissões incorporadas de CO<sub>2</sub> de uma edificação residencial completa com base no orçamento prévio do projeto executivo e nos dados reais do canteiro de obras, visando acessar os potenciais impactos ambientais referentes a construção dessa edificação, optou-se pela aplicação da metodologia de ACV, já consolidada no setor da construção a nível mundial e amplamente utilizada por organizações de pesquisa e desenvolvimento (LETI, 2020b; Adams *et al.*, 2019; Bahramian; Yetilmezsoy, 2020; LCBI, 2024; UKGBC, 2019; Burrows; Black , 2021; Yokoo *et al.*, 2016).

Para tanto, todas as etapas pertinentes à realização de uma ACV serão conduzidas e apresentadas neste estudo, que seguirá em conformidade com a norma brasileira ABNT NBR 14040, que estabelece os princípios e a estrutura para a avaliação do ciclo de vida de produtos e serviços, amparada pela norma europeia EN 15978 de 2011, voltada para a performance ambiental de edificações, e a EN 15809:2012+A2:2019, que define regras básicas para a declaração ambiental de produtos de construção, estabelecendo a metodologia para avaliar seu impacto ambiental durante o ciclo de vida.

De acordo com a NBR 14040, a condução de uma ACV compreende quatro fases básicas, sendo elas: 1) Definição do Escopo, 2) Análise do Inventário de Ciclo de Vida (ICV), 3) Avaliação do Inventário de Ciclo de Vida (AICV) e 4) Interpretação dos Resultados.

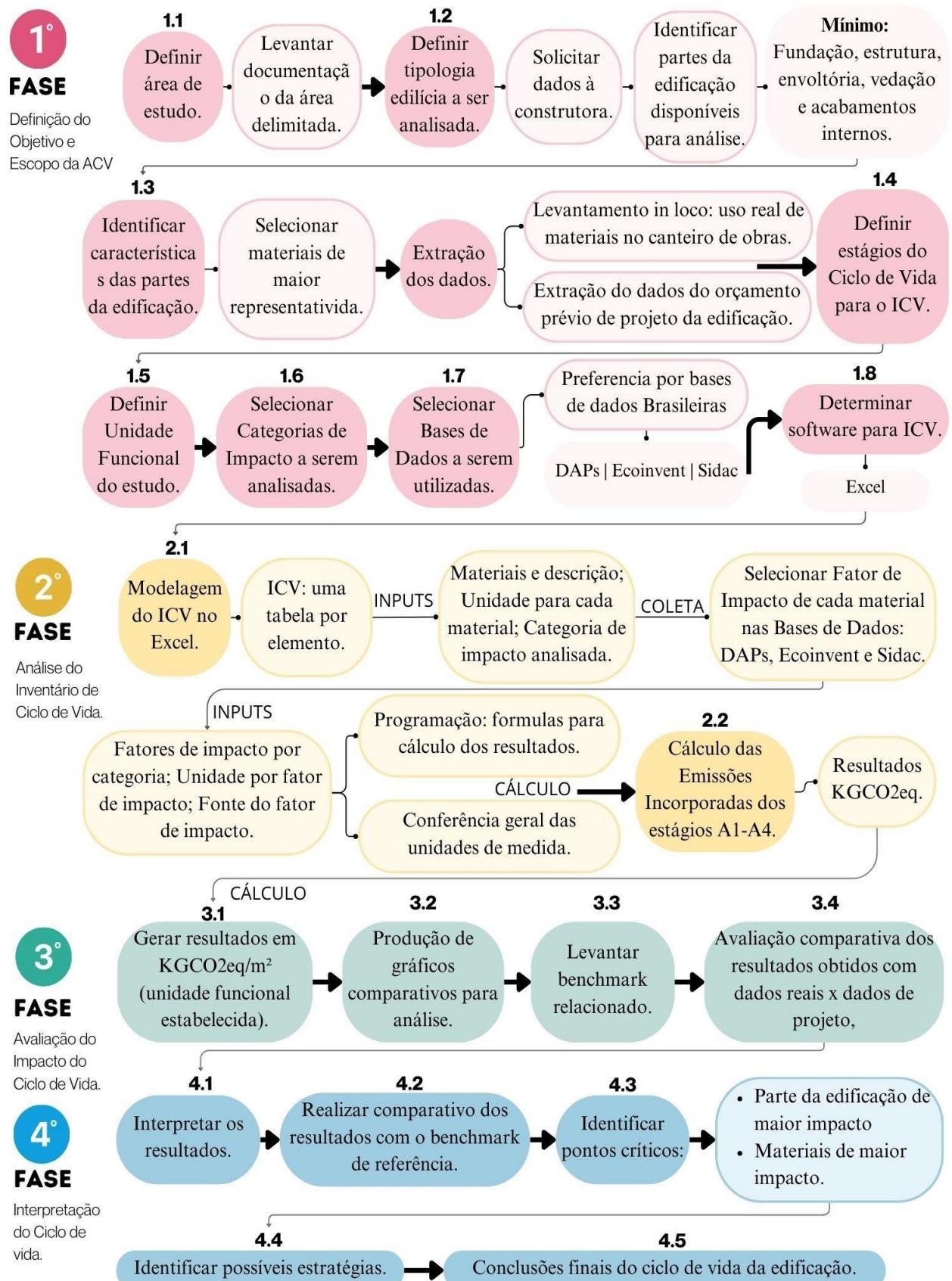
A **Figura 4** apresenta um fluxograma metodológico deste estudo onde as quatro fases da metodologia de ACV são associadas às atividades realizadas ao longo do processo de pesquisa. O fluxo metodológico deste estudo foi dividido em 4 fases, correspondentes às fases da ACV apresentada na ABNT NBR 14040. Para cada fase, além das etapas apresentadas na norma, foram adicionadas etapas pertinentes e necessárias para a aplicação da ACV neste estudo.

A 1º Fase, definição do objetivo e escopo da ACV, inicia com a 1.1) Definição geográfica da área de estudo que engloba a coleta de normativas, legislações, manuais, e demais documentações referentes a região. Em sequência, na subfase 1.2) Definir a tipologia edilícia a

ser analisada, o principal critério para definição da edificação a ser analisada foi a liberação do acesso aos dados e ao canteiro de obras pela construtora responsável, englobando no mínimo os dados dos elementos fundação, estrutura, envoltória, partições internas e acabamentos internos. Dando continuidade, na subfase 1.3) Identificar características das partes da edificação, foram selecionados os materiais de maior representatividade para cada elemento da edificação. Na subfase 1.4) Extração dos dados, foi realizada a coleta dos dados da edificação necessários para alimentar o ICV. A partir do projeto executivo e do orçamento prévio de projeto foram coletados os dados denominados Dados de Projeto, ademais também foram coletados dados in loco no próprio canteiro de obras da edificação, através de notas fiscais documentação interna da obra obtendo assim o consumo efetivo de cada material, estes denominados Dados Reais. A subfase 1.5 a 1.8 refere-se à definição dos estágios do ciclo de vida abrangidos pelo estudo, unidade funcional adotada, categorias de impacto analisadas no estudo, bases de dados e software utilizados para o inventário de ciclo de vida. Após a finalização de todas essas subfases, conclui-se a 1º Fase da metodologia empregada nesta pesquisa. No tópico 4.1 deste capítulo encontram-se todos os detalhes da realização desta primeira fase metodológica.

A 2º Fase da metodologia proposta, Análise do Inventário de Ciclo de Vida, inicia-se com a subfase 2.1) Modelagem do ICV. Aqui, para cada elemento da edificação analisado foi criada uma planilha, que está composta pela descrição de cada material, sua unidade e a categoria de impacto analisada. Na subfase 2.2) *Inputs* por material, inseriu-se o quantitativo de cada material obtido através da coleta dos Dados de Projeto e Dados reais, os fatores de impacto para cada material de acordo com a categoria de impacto em estudo, a unidade e a fonte de cada fator de impacto. As subfases 2.3 e 2.4 finalizam a 2º Fase da metodologia com a programação das fórmulas para cálculo dos resultados e o cálculo das emissões incorporadas dos estágios A1 a A5, **Figura 4**.

Figura 4 - Fluxo metodológico para condução da ACV neste estudo.



Denominada Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida, a 3º fase da metodologia começa com a subfase 3.1) Gerar resultados em kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> e kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>/ano. Aqui, os resultados em kg CO<sub>2</sub>-eq obtidos no final da 2º Fase são divididos pela área total da edificação para obter os resultados em kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> de área construída e a vida útil considerada. Em sequência, na subfase 3.2 foram produzidos os gráficos comparativos dos resultados obtidos com os Dados de projeto e os Dados reais. Na subfase 3.3 levantou-se o benchmark relacionado para futura interpretação dos resultados. A subfase 3.4 finaliza a terceira etapa metodológica com uma avaliação comparativa do impacto do ciclo de vida com inputs de projeto e inputs reais.

Para finalizar o fluxo metodológico desta pesquisa, a 4º Fase, Interpretação do Ciclo de Vida, inicia-se com a subfase 4.1) Interpretação dos resultados, seguida pela 4.2) Avaliação comparativa dos resultados obtidos e o Benchmark levantado. As subfases 4.3) Identificar os pontos críticos do Ciclo de Vida da edificação, 4.4) Apresentar possíveis estratégias para redução do impacto ambiental e 4.5) Conclusões finais do Ciclo de Vida da edificação finalizam a metodologia.

### **3.1 DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ESCOPO DA ACV**

#### **3.1.1 Objetivo: Aplicações pretendidas**

O presente estudo busca quantificar as emissões embutidas (EEs) dos estágios A1 a A5, do berço ao canteiro de obra, de uma edificação residencial multifamiliar de alto padrão completa, abrangendo os elementos de fundação, estrutura, envoltória, partições internas e acabamentos internos de piso, parede e teto.

Com esta pesquisa pretende-se contribuir cientificamente não só com a análise das emissões embutidas uma edificação de tipologia tradicionalmente construída em Brasília (DF), mas também com o cálculo das emissões da etapa de fundação, frequentemente negligenciada em outros estudos, e principalmente com a realização de uma ACV alimentada com dados reais originários diretamente do canteiro de obras.

Dessa forma, o presente estudo poderá auxiliar na tomada de decisões por parte dos profissionais da área da construção civil em relação a escolha de materiais e processos construtivos, visando reduzir as emissões de carbono ao longo do ciclo de vida da edificação, incentivar a maior aplicação da ACV no setor da construção civil, seja na fabricação dos materiais construtivos ou na execução de edificações, e gerar um banco de referência real a partir dos resultados obtidos com a ACV alimentada com dados reais.

### 3.1.2 Limitações do método, suposições e impactos abrangidos

A principal limitação deste estudo está relacionada às bases de dados utilizadas. Embora tenha sido preferido o uso de fatores de impacto brasileiros, não foram encontradas Declarações Ambientais de Produtos (DAP) brasileiras para alguns materiais do Inventário do Ciclo de Vida (ICV). Como resultado, foi necessário recorrer à base de dados internacional *Ecoinvent*. Apesar de incluir alguns valores específicos para o Brasil, a maioria dos dados fornecidos pela *Ecoinvent* refere-se a fatores de impacto de outros países. Esse desafio destaca a dificuldade atual em obter dados diretamente da indústria e a ausência de uma base de dados completamente adaptada à realidade brasileira, que abranja todas as categorias de impacto ambiental contempladas pela metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida.

A segunda limitação deste estudo refere-se aos estágios do ciclo de vida analisados. Para esta pesquisa, foram considerados os estágios de Produto (A1-A3), Transporte (A4) e Processos de Construção (A5), excluindo os estágios de Uso e Manutenção (B1-B7), Fim de Vida (C1-C3) e Além do Ciclo de Vida do edifício (D). Tal exclusão justifica-se pelo objetivo do estudo, que visa quantificar apenas as emissões embutidas do berço ao sítio. A **Figura 5** destaca os estágios e os módulos do ciclo de vida da edificação que foram considerados na análise de impacto ambiental, do berço ao sítio, neste estudo.

Figura 5 - Fases do ciclo de vida da edificação considerados.

CICLO DE VIDA DA EDIFICAÇÃO														Informações Adicionais		
Pré-uso					Uso							Pós-uso				
Estágio de Produto			Estágio de Construção		Estágio de Uso e Manutenção							Estágio de Fim de Vida			Estágio de Beneficiamento	
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
Extração matéria prima	Transporte	Fabricação	Transporte	Processo construtivo	Uso	Mantenção	Reparo	Substituição dos materiais	Reformas	Uso de energia	Uso de água	Demolição	Transporte	Processamento de resíduos	Disposição final	Recuperação Reuso Reciclagem
Impacto Incorporado	Impacto Incorporado	Impacto Incorporado			Impacto Incorporado			Impacto Operacional		Impacto Incorporado			Impacto Incorporado e Operacional			
Berço ao Sítio																

Fonte: Adaptado de EM 15978 (2011).

### 3.1.3 PÚBLICO-ALVO

A presente pesquisa constitui um estudo científico que será publicado para disseminar conhecimentos na academia, com ênfase nas áreas de construção civil, sustentabilidade e meio ambiente. Portanto, o público-alvo deste trabalho inclui acadêmicos, pesquisadores, arquitetos, engenheiros e formuladores de políticas públicas.

### 3.1.4 VIDA ÚTIL E UNIDADE DECLARADA

De acordo com a NBR 15575 (ABNT, 2013), que trata dos requisitos gerais de desempenho para edificações habitacionais, a Vida Útil de Projeto (VUP) é um conceito que deve ser considerado em termos de durabilidade e desempenho dos materiais e sistemas utilizados nas edificações. Para edifícios habitacionais, a norma estabelece que a VUP é de 50 anos. Este período reflete o tempo durante o qual se espera que a edificação mantenha suas características funcionais e estruturais sem a necessidade de reformas substanciais. Sendo assim, este estudo seguirá em conformidade com a norma brasileira e adotará o VUP de 50 anos.

Neste estudo, a unidade de comparação adotada é a Unidade Declarada, conforme especificado na norma DS/EN 15804:2012+A2:2019 (European Committee for Standardization, 2019). Esta unidade é empregada na ACV de edificações para expressar o desempenho ambiental de um produto ou serviço quando não se considera o ciclo de vida completo, como no caso desta pesquisa, que analisa apenas as fases de produto e construção.

Diante do exposto, a unidade declarada adotada neste estudo é: 1 m<sup>2</sup> de área construída da edificação em análise. De acordo com Silva e Silva (2015), apresentar os impactos ajustados por unidade de área construída é fundamental para ampliar a aplicabilidade dos resultados, evitando a necessidade de avaliação de cada projeto arquitetônico individualmente por região. Esse método simplifica a comunicação dos desempenhos ao público e fornece uma base sólida para a definição de metas de projeto.

### 3.1.5 BASES DE DADOS UTILIZADAS

Esse estudo realizou a avaliação de ciclo de vida com dados reais, sendo utilizado fatores de impacto condizentes com a realidade brasileira. Sendo assim, optou-se por priorizar o uso

de Declarações Ambientais de Produto (DAP) de origem brasileira, se possível até mesmo do próprio fornecer da obra da edificação.

O SIDAC também foi utilizado. Esse sistema brasileiro permite calcular indicadores de desempenho ambiental de produtos de construção com base em dados brasileiros e nos conceitos da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

Devido à ausência de DAPs para alguns materiais inventariados, também foi utilizada a base de dados *Ecoinvent*, uma base de dados internacionalmente reconhecida e que conta com alguns dados brasileiros. Em último caso, foram utilizados dados de outros países.

### **3.1.6 Metodologia de avaliação**

A metodologia de avaliação utilizada neste estudo, focada exclusivamente nas emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), segue os princípios estabelecidos pela NBR 14.040, que define a estrutura geral para a condução da Análise do Ciclo de Vida (ACV) no Brasil. Além disso, o estudo é complementado pela EN 15.978, que fornece diretrizes específicas para a aplicação da ACV em produtos de construção, com ênfase na quantificação das emissões de GEE. A combinação dessas normas garante uma abordagem consistente e padronizada, permitindo uma avaliação precisa do impacto ambiental da edificação ao longo de seu ciclo de vida.

### **3.1.7 Estrutura de modelagem do Inventário de Ciclo de Vida (ICV)**

A estrutura de modelagem do Inventário de ciclo de vida deste estudo foi realizada por tabulação de dados no programa *Excel*. O **Quadro 4** destaca, de forma resumida, o objetivo e o escopo da Avaliação de Ciclo de Vida apresentando as principais informações para sua condução conforme a ABNT NBR 14040.

Quadro 3 - Informações para condução da ACV.

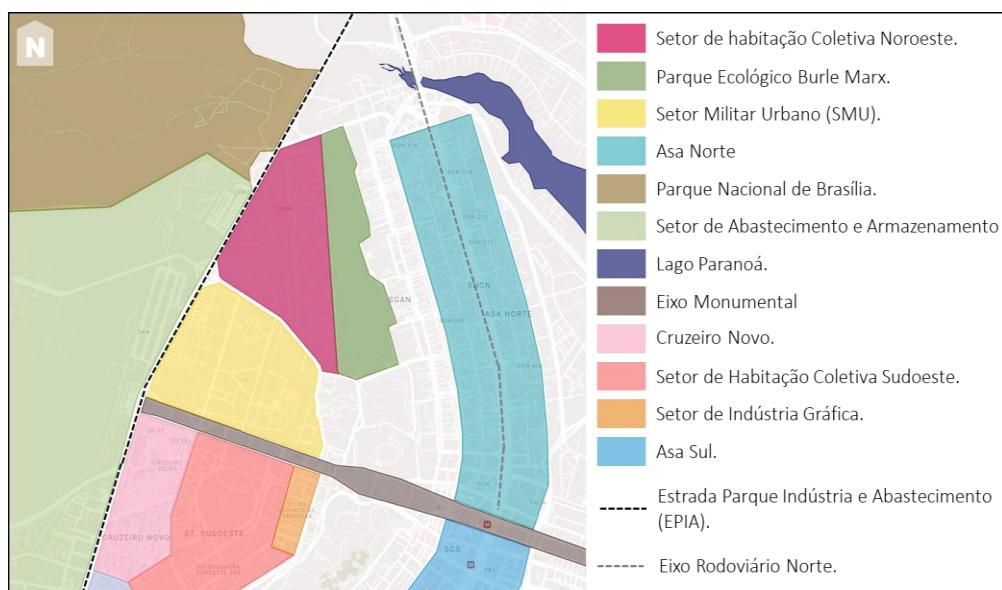
Metodologia de avaliação	NBR 14.040, apoiada pela EN 15.978
Estágios do ciclo de vida abrangidos	Estágio de produto e estágio de construção: A1 – A5, do berço ao canteiro de obras.
Partes analisadas da edificação	<ul style="list-style-type: none"> <li>1) Fundação;</li> <li>2) Estrutura;</li> <li>3) Envoltória;</li> <li>4) Partições internas;</li> <li>5) Acabamentos internos.</li> </ul>

Método de quantificação dos materiais	Organização do quantitativo de materiais do orçamento prévio e do controle de matérias do canteiro de obras concedidos para construtora.
Bases de dados utilizadas	<i>Ecoinvent</i> , DAP, SIDAC. Utilizando preferencialmente dados Brasileiros.
Software utilizado para ICV	Tabulação de Dados
Vida útil do edifício	50 anos (ASBEA, 2015; NBR 15.575, 2013)
Público-alvo	Pesquisadores, projetistas, formadores de políticas públicas.
Unidade Declarada	1m <sup>2</sup> de área construída
Categoria de Impacto selecionada	Mudanças Climáticas (PAG: Potencial de Aquecimento Global) em kg CO <sub>2</sub> -eq.

### 3.2 ESTUDO DE CASO

Para este estudo, estabeleceu-se o setor Noroeste, localizado em Brasília, Distrito Federal, como área de estudo, um dos bairros mais recentes de Brasília. Situado na região central de Brasília, está localizado entre o Parque Nacional de Brasília ao norte e o Eixo Monumental ao sul, limita-se a oeste com o Setor de Abastecimento e Armazenamento e a leste com o Setor de Grandes Áreas Norte, seguido pelas superquadras norte (**Figura 6**). Ademais, o setor está às margens da Estrada Parque Indústria e Abastecimento (EPIA), via que conecta o Noroeste a BR-060 e a outras regiões do DF.

Figura 6 - Localização do Setor Noroeste, Brasília - DF.

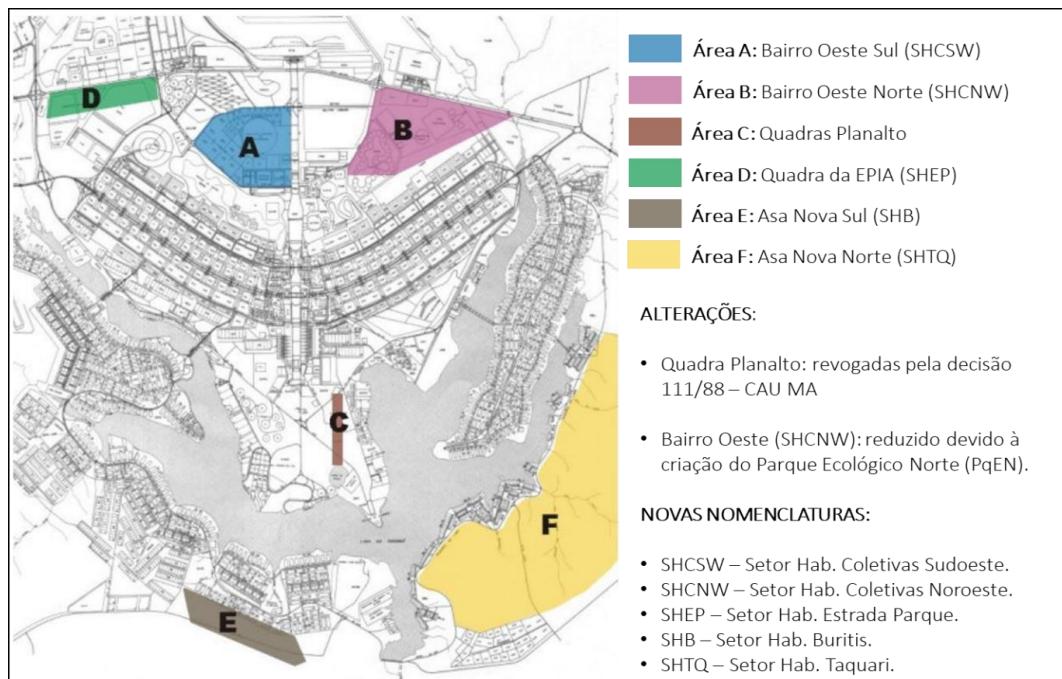


Fonte: Adaptado de Google Maps (2025).

O bairro Noroeste faz parte do projeto “Brasília Revisitada”, elaborado por Lúcio Costa em 1987. Para esse projeto o intuito inicial foi preservar os elementos essenciais do projeto original da capital e, depois, orientar a expansão para manter sua função político-administrativa. Na escala residencial, a preservação focou em manter os edifícios no estilo das superquadras, que Lúcio Costa considerava uma nova forma de viver, característica de Brasília. Destacou-se o modelo de edifícios de 6 pavimentos com o térreo livre sobre pilotis, assegurando a preservação do solo público e reforçando a lógica das projeções urbanísticas.

O setor Noroeste faz parte da Área de Expansão B, **Figura 7**, dentro da Zona Urbana do Conjunto Tombado. Iniciado em 2009, o setor abrange uma área de 825 hectares e é composto por 20 superquadras residenciais (SQNW), onde cada quadra possui 11 projeções, todas com 6 pavimentos sobre pilotis. As SQNWs são organizadas em grupos de 4, alternando-se com o Comércio Local (CLNW), de forma similar às superquadras tradicionais das Asas Sul e Norte de Brasília. Ao total são 220 projeções residenciais, 62 blocos de destinação mista (comercial e residencial) e 133 lotes para uso múltiplo (Glehn e Kos, 2021).

Figura 7 - Proposta para áreas de expansão urbana do Brasília revisitada.



Fonte: Costa, Brasília Revisitada (1987).

A implementação do setor Noroeste foi dividida em duas etapas onde a primeira, iniciada em 2009, é composta por projeções residenciais no formato retangular com medidas de 12,5 x 80 metros e as quadradas com 32 x 32 metros; enquanto na segunda etapa, iniciada

em 2013, as projeções foram reduzidas, tendo dimensões de 11,5 x 80 metros e as quadradas de 30 x 30 metros. O edifício avaliado no presente estudo é da segunda etapa.

A 1<sup>a</sup> etapa, até o ano de 2022, já possuía 84 projeções residenciais construídas, das 100 disponíveis. A implementação da 2<sup>a</sup> etapa do setor ainda está em estágio intermediário, algumas edificações já foram finalizadas, muitas projeções ainda estão sendo construídas e outras permanecem vagas. Em um levantamento feito pelo *Google Maps* e presencial à segunda etapa do Setor Noroeste, constatou-se que entre as 110 projeções residenciais dispostas nas quadras 102 a 106 e 302 a 306, 55 edificações já foram finalizadas, 26 projeções estão com canteiro de obras ativo e 28 estão vagas (**Figura 8**).

Figura 8 - 2º Etapa de implementação do Setor Noroeste: Projeções ocupadas, com canteiro de obras e vazias.



Fonte: Adaptado de Google Maps (2024).

Projetado para ser o primeiro bairro ecológico do Brasil, o Setor Noroeste conta com um Plano de Gestão Ambiental de Implantação (PGAI), formalizado no documento denominado Manual Verde. Desenvolvido pela Terracap em 2009, esse manual estabelece diretrizes de sustentabilidade para o setor, com base nos critérios da certificação LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) para bairros (versão piloto), promovida pelo *United States Green Building Council* (USGBC), visando à obtenção da certificação ambiental. Em consonância com a temática deste estudo, o capítulo 10.2 do *Manual Verde* apresenta diretrizes voltadas à mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), à redução do consumo de energia e água, à melhoria da qualidade ambiental e à minimização dos impactos ambientais das edificações.

Diante do contexto apresentado, a escolha do Setor Noroeste como local de estudo justifica-se pela oportunidade de avaliar o impacto ambiental de uma edificação que segue um

Plano de Gestão Ambiental de Implantação previamente definido e voltado para a consolidação de um bairro ecológico.

Outrossim, a tipologia edilícia encontrada no Noroeste é característica das tradicionais superquadras de Brasília, comumente replicada pela cidade. Por demais o setor possui diversas edificações com canteiro de obras ativo, principalmente nas quadras contempladas na sua 2º etapa de implementação, fator esse que amplia as possibilidades de obter dados reais da edificação para aplicar na ACV.

Com o objetivo de avaliar as emissões de gases de efeito estufa (GEEs) provenientes dos estágios A1-A5 abrangendo os elementos da fundação, estrutura, envoltória, partições internas e acabamentos internos, foi selecionada uma edificação cuja construtora fornecesse os dados necessários para a realização da análise de ciclo de vida (ACV) com insumos reais (materiais efetivamente utilizados na obra).

A escolha da edificação para o estudo de caso limitou-se às superquadras de final 02 a 06 do setor Noroeste, por apresentarem maior número de canteiros de obra ativos. O **Quadro 5** apresenta os principais critérios elencados para determinar a edificação que será objeto de estudo do presente trabalho.

#### Quadro 4 - Principais critérios para escolha da edificação.

I	A edificação deve estar localizada no Setor de habitação coletiva Noroeste.
II	A construção da edificação deve estar em andamento, com canteiro de obras ativo. A construtora responsável pela obra deve estar disposta a concordar com o estudo,
III	concedendo o orçamento prévio de materiais do projeto executivo e permitindo o acesso da autora à obra para coletar o quantitativo real de materiais empregados na construção.

O critério I está relacionado à escolha geográfica já explicada anteriormente. Já os critérios II e III estão relacionados à fonte dos dados de alimentação da ACV, previamente determinados no objetivo deste estudo. Um dos principais fatores que impede a maior aplicação da ACV no setor da construção civil é o acesso a dados verídicos, que permitam uma análise de desempenho ambiental realistas. Sendo assim, determinou-se como premissa para esse estudo a alimentação da ACV não só com dados provenientes do projeto executivo da edificação, mas também com dados reais originários do próprio canteiro de obras. Para tanto, foi necessário o acesso ao canteiro de obras da edificação.

A edificação residencial multifamiliar avaliada está implantada na projeção C, **Figura 9**, de uma das superquadras da segunda etapa construtiva do Setor Noroeste.

Figura 9 - Projeção de implantação da edificação em estudo: Projeção C.

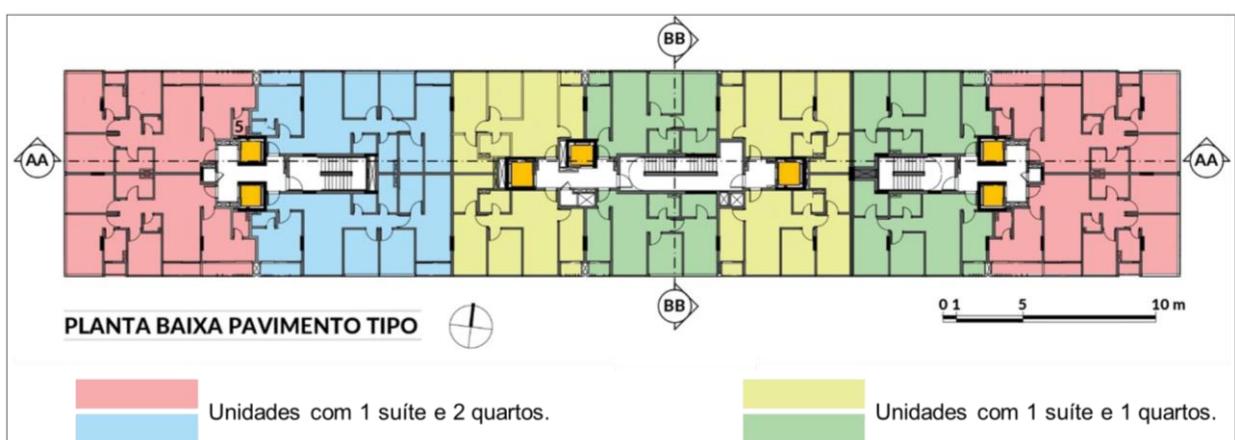


Fonte: Adaptado da construtora (2024).

Sua obra foi iniciada em maio de 2021 e finalizada em fevereiro de 2024. A escolha da edificação justifica-se então pela liberação de tais dados pela construtora da edificação. O contato com a construtora foi feito no segundo semestre de 2023, o que permitiu realizar as visitas técnicas à obra e fazer a coleta de dados para a pesquisa.

A edificação está implantada em uma projeção retangular de 920 m<sup>2</sup>, um lote com 80 metros de comprimento por 11,5 m de largura, e segue o padrão das edificações tradicionais das SQS e SQN de Brasília: térreo em pilotis mais 6 pavimentos. O pavimento tipo da edificação, do 1º ao 5º andar, é composto por 14 apartamentos, sendo 8 unidades com 2 quartos e 6 unidades com 3 quartos (**Figura 10**).

Figura 10 - Planta baixa do pavimento tipo da edificação em estudo.



Fonte: Adaptado da construtora (2024).

No 6º pavimento encontram-se 14 apartamentos, sendo 6 coberturas duplex com 3 quartos cada e área de lazer privativa na cobertura e 8 apartamentos de 2 quartos cada. A edificação inclui uma área de lazer coletiva localizada no mesmo nível do segundo andar das coberturas duplex privativas, além de contar com dois subsolos de garagem, um reservatório inferior e outro superior. As principais características da edificação foram resumidas nos **Quadros 6 e 7**.

**Quadro 5 - Principais características da edificação.**

Área total da projeção:	920 m <sup>2</sup>
Número de pavimentos:	Térreo em pilotis + 6 pavimentos.
Cota de coroamento:	31 metros.
Apartamentos de 2 quartos:	48 unidades de 64,24 a 68,14 m <sup>2</sup> cada.
Apartamentos de 3 quartos:	30 unidades de 102,25 a 102,42 m <sup>2</sup> cada.
Cobertura duplex privativa:	6 unidades de 210,99 a 220,41 m <sup>2</sup> cada.
Área total da edificação:	14.203,67 m <sup>2</sup> .

Fonte: Dados concedidos pela construtora (2023).

**Quadro 6 - Quadro de áreas da edificação.**

Pavimento	Área (m <sup>2</sup> )
Reservatório Inferior	280,35 m <sup>2</sup>
1º Subsolo (garagem)	2.506,63 m <sup>2</sup>
2º Subsolo (garagem)	2.307,85 m <sup>2</sup>
Térreo em pilotis	920,00 m <sup>2</sup>
1º ao 6º pavimento	1.260,00 m <sup>2</sup> por pavimento
Cobertura	1.260,00 m <sup>2</sup>
Barrilete	98,99 m <sup>2</sup>
Reservatório Superior	105,36 m <sup>2</sup>

Fonte: Dados concedidos pela construtora (2023).

### 3.2.1 Elementos edilícios abrangidos pelo estudo

Para esse estudo cinco elementos dessa edificação foram analisados, sendo 1) Fundação, 2) Estrutura, 3) Envoltória, 4) Partições Internas e 5) Acabamentos Internos.

### 3.2.1.1 Fundação

A fundação da edificação é composta por sapatas isoladas escavadas a céu aberto, com profundidade média de 2 metros, dimensionadas com base no relatório de sondagem, **Figura 11**. O solo do local é classificado como duríssimo, composto predominantemente por arenito altamente compactado, o que conferiu grande resistência à escavação, **Figura 12**.

Figura 11 - Detalhamento da Fundação tipo sapata e imagem das sapatas do edifício avaliado.

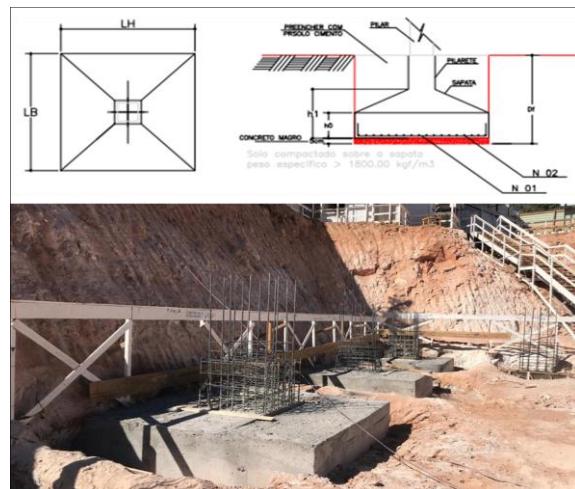


Figura 12 - Presença de rocha arenita no terreno do edifício avaliado.

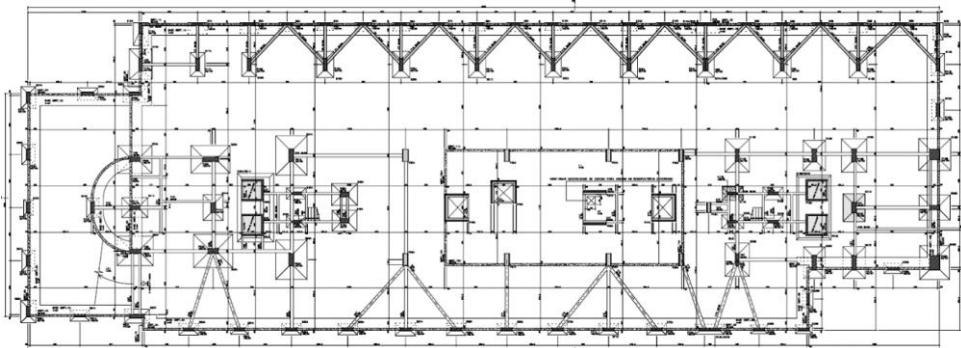


Fonte: A autora (2024).

Para viabilizar a execução das fundações, foram empregadas técnicas especializadas, incluindo o uso de picões, rompedores e marteletes pneumáticos para a remoção das camadas mais resistentes. As sapatas transferem as cargas estruturais para o terreno e são interligadas por vigas baldrames de concreto armado, que distribuem os esforços e reduzem os riscos de recalques diferenciais. Detalhe de um corte parcial no projeto estrutural das vigas baldrames, **Figura 13** e **Figura 14**, mostra a existência de vigas com grandes dimensões, conforme as

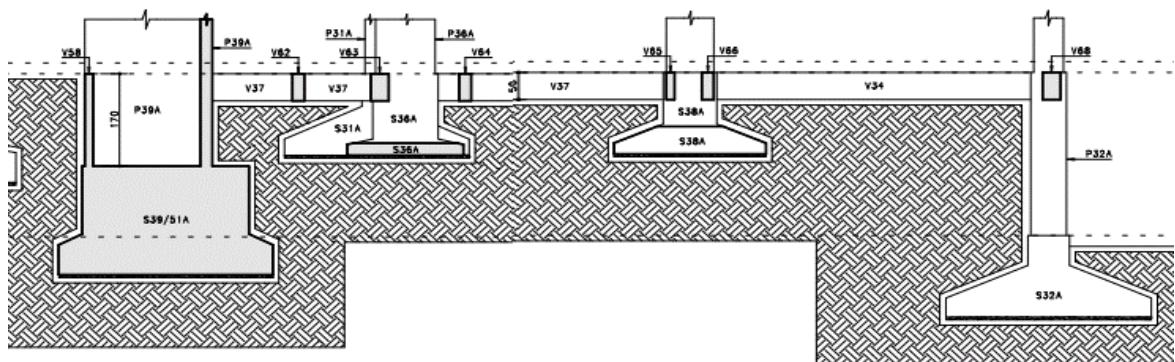
cargas que precisam suportar e a configuração da edificação, tendo alturas em vários pontos acima de 50 cm.

Figura 13 - Projeto estrutural das vigas baldrames do edifício avaliado.



Fonte: Adaptado da construtora (2024).

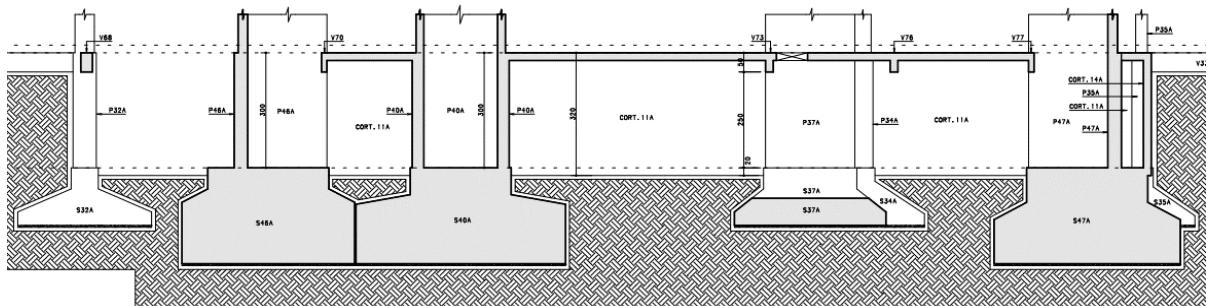
Figura 14 - Detalhe do corte AA do projeto estrutural das vigas baldrames do edifício avaliado.



Fonte: Adaptado da construtora (2024).

Além disso, foi executada uma cortina de contenção em concreto armado com aproximadamente 3 metros de altura, **Figura 15**, para garantir a estabilidade da obra, especialmente devido à presença de dois subsolos e edificações vizinhas.

Figura 15 - Detalhe do corte AA do projeto estrutural que apresenta parte da cortina de contenção do edifício avaliado.

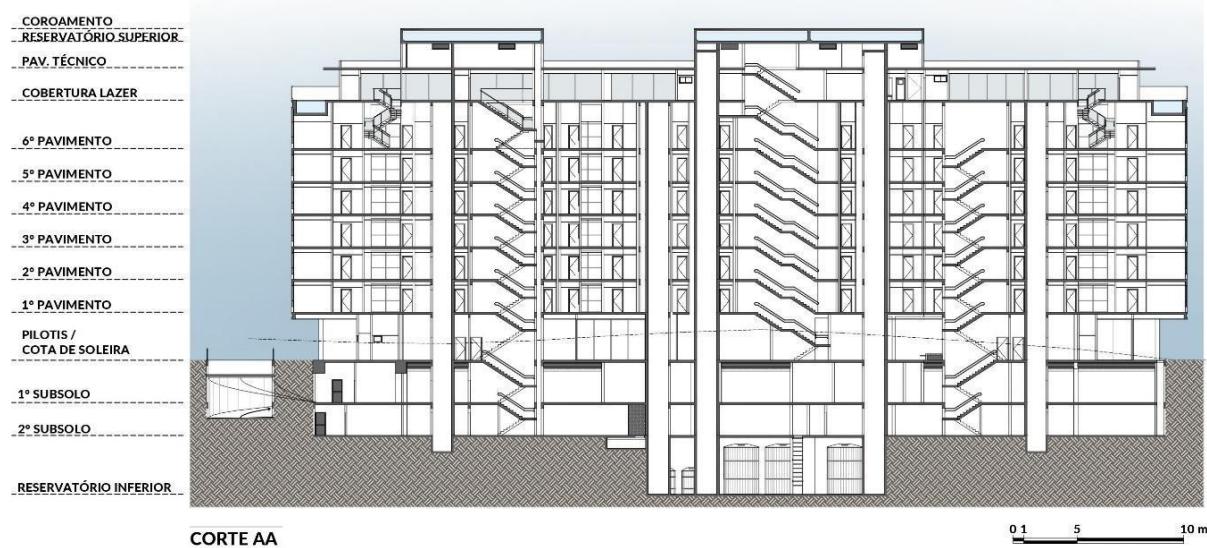


Fonte: Adaptado da construtora (2024).

### 3.2.1.2 Estrutura

A estrutura da edificação é formada por pilares, vigas e lajes de concreto armado, projetados para garantir estabilidade e resistência às cargas atuantes (**Figura 16**). No total, foram executados 59 pilares contínuos em concreto usinado de  $f_{ck}$  40 MPa, com dimensões variadas conforme sua função estrutural. Entre eles, destacam-se os pilares dos sete poços de elevadores, que possuem seções maiores para suportar esforços concentrados. As vigas de concreto armado interligam os pilares e contribuem para a rigidez estrutural, auxiliando na distribuição das cargas para a fundação.

Figura 16 - Corte Longitudinal (AA) da edificação em estudo.



Fonte: Adaptado do projeto executivo (2024).

A laje pretendida, com espessura de 20 cm, foi adotada devido à necessidade de vencer grandes vãos sem o uso de vigas intermediárias, proporcionando maior flexibilidade no layout

interno dos pavimentos. Esse sistema estrutural melhora o desempenho da edificação ao reduzir deformações e fissuras, além de otimizar o consumo de materiais, uma vez que permite a redução da quantidade de concreto e aço empregados na obra. A escolha da laje protendida foi baseada na análise das cargas atuantes e na busca por um equilíbrio entre eficiência estrutural e economia de materiais, contribuindo para a redução do impacto ambiental da construção.

### 3.2.1.3 Envoltória

A envoltória do edifício adota um sistema de fachada unitizada, composto por módulos pré-fabricados de alumínio, vidro temperado de 8 mm e granito, montados diretamente no canteiro de obras. A **Figura 17** apresenta o protótipo desenvolvido em obra para montagem dos módulos da envoltória.

Figura 17 - Modelo padrão para os módulos da fachada unitizada feito no canteiro de obras.



Fonte: A autora (2024).

O cálculo do Percentual de Abertura das Fachadas (PAF) revelou que a maior taxa de abertura ocorre nos pavimentos padrão, cerca de 63,4%, enquanto as fachadas frontais (**Figura 18**) e posterior (**Figura 19**) apresentam um PAF total de 54,22%.

Para melhor compreender a relação entre a área de fachada e a quantidade de material empregado em sua construção, calculou-se o Percentual de Abertura das Fachadas (PAF). Cada fachada foi dividida em 3 níveis: 1) Pilotis, 2) 1° ao 6° pavimento e 3) Cobertura, conforme a **Figura 18**, ademais, o PAF geral das fachadas também foi calculado. Na fachada frontal da edificação, o PAF do nível 1) Pilotis é de 32%, no nível 2) 1° ao 6° pavimento encontra-se o maior PAF da edificação, atingindo 63,40% e no nível 3) Cobertura 28,50%.

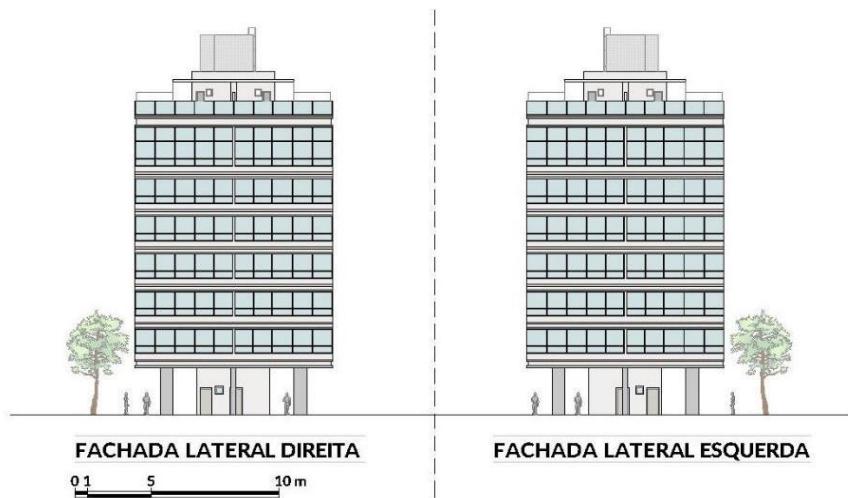
Figura 18 - Fachada frontal da edificação em estudo.



Fonte: Adaptado do projeto executivo (2024).

A fachada posterior da edificação é o espelho da fachada frontal, possuindo assim o mesmo percentual de abertura nos 3 níveis. O PAF total encontrado para a fachada frontal completa e posterior completa é de 54,22%. Já as fachadas lateral direita e lateral esquerda, apresentadas na **Figura 19**, o PAF para o nível 1 - pilotis é de 11,06%, o nível 2 - 1º ao 6º pavimento atingiu 58% de PAF e no nível 3 - cobertura é de 32%.

Figura 19 - Fachada lateral direita e lateral esquerda.



Fonte: Adaptado do projeto executivo (2024).

A alta taxa de abertura está relacionada ao uso significativo de vidro nas fachadas, diminuindo a necessidade de materiais opacos como alvenaria ou revestimentos sólidos. Isso afeta tanto a estética arquitetônica quanto o volume de materiais empregados na construção, impactando as emissões associadas à fabricação e transporte desses insumos.

### 3.2.1.4 Partições Internas

As partições internas da edificação também foram analisadas neste estudo, considerando que desempenham um papel significativo na contabilização das emissões GEEs, devido ao elevado volume de materiais construtivos envolvidos. Além de serem elementos essenciais para a compartimentação dos espaços, essas divisórias desempenham um papel crucial na sustentabilidade da edificação, dado o impacto ambiental dos materiais empregados.

Ao contrário da tendência observada em muitas construções residenciais multifamiliares contemporâneas, onde o sistema de *drywall* é adotado pela sua leveza, praticidade e agilidade de execução, a edificação em estudo opta por um método mais tradicional e robusto para suas partições internas. As paredes internas são todas compostas por tijolos cerâmicos ou blocos de concreto, materiais que têm influência direta no desempenho termo acústico dos ambientes.

### 3.2.1.5 Acabamentos Internos

Os acabamentos internos também foram incluídos nesta análise das emissões embutidas de GEEs, considerando seu potencial estratégico para a redução das emissões ao longo do ciclo de vida da construção. Esse estudo objetiva uma análise do berço ao sítio, o que envolve considerar a edificação em sua totalidade, já concluída e pronta para uso pelos futuros ocupantes. Dessa forma, torna-se indispensável a inclusão dos acabamentos internos, que são componentes essenciais na entrega final da obra.

Muitos acabamentos, como porcelanatos, revestimentos cerâmicos, pedras naturais e pinturas, têm um alto impacto de carbono devido aos processos de fabricação, que envolvem grande consumo de energia e emissões de poluentes, e ao transporte, especialmente quando os materiais são transportados por longas distâncias. A utilização de recursos naturais, como pedras, e o alto consumo de energia na produção de revestimentos cerâmicos e porcelanatos aumentam ainda mais a pegada ecológica da construção.

## 3.3 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA – ICV

### 3.3.1 Coleta de Dados

Para a elaboração do ICV da edificação, foi realizada uma coleta detalhada de informações, abrangendo tanto os Dados de Projeto quanto os Dados Reais de Obra. O

levantamento foi conduzido com foco nos cinco principais elementos previamente definidos: fundação, estrutura, envoltória, partições internas e acabamentos internos. Essa abordagem permitiu uma análise abrangente e comparativa entre os valores estimados para o projeto e os efetivamente empregados na construção.

Durante o processo de coleta de dados, foi necessário ajustar a seleção de alguns materiais, sendo adicionados devido à sua relevância e representatividade no contexto da edificação, enquanto outros precisaram ser excluídos por falta de dados suficientes para uma avaliação confiável ou por apresentarem uma contribuição insignificante para os resultados finais (**Quadro 8**).

Quadro 7 - Materiais construtivos avaliados para cada elemento da edificação.

<b>Elemento da Edificação</b>	<b>Materiais Quantificados</b>
Fundação	Concreto usinado FCK = 40MPA.
	Armadura em aço CA-50.
	Brita.
Estrutura	Concreto usinado Fck = 40 MPa.
	Aço CA-50: barras retas, tela soldada nervurada, malha pré-fabricada.
	Brita.
	Madeira aplainada compensada plastificada para forma de concreto.
Envoltória	Vidro temperado 8mm (esquadrias).
	Vidro temperado 10mm (esquadrias).
	Alumínio (esquadrias).
	Alumínio (brises da envoltória).
	Alumínio (requadros).
	Granito.
	Argamassa pré-fabricada.
	Cimento.
	Revestimento Cerâmico.
	Bloco de concreto.
Partição interna	Bloco de Concreto.
	Bloco Cerâmico.
	Chapisco.
	Cimento.
	Esquadria de madeira: Porta pronta.
Acabamentos internos	Argamassa pré-fabricada.
	Argamassa colante.
	Argamassa refratária.
	Geral

Piso	Contrapiso. Piso Porcelanato. Piso Cerâmico. Piso Vinílico. Rejunte. Granito (soleiras, filetes, rodapés, peitoris e roda piscina). Pintura látex-acrílica.
Parede	Granito. Porcelanato. Revestimento Cerâmico. Massa PVA. Pintura parede: tinta acrílica. Revestimento em massa a base de resina e resíduos de granito e mármore.
Teto	Gesso em saco. Chapa de gesso acartonado. Massa PVA para gesso. Pintura teto: tinta acrílica.
Bancadas	Granito (bancadas dos banheiros, cozinhas e áreas de serviço).

Na fundação foram contabilizados o concreto usinado de 40 MPa, a armadura de aço CA-50 e a brita. No elemento estrutura considerou-se o concreto usinado de 40 MPa, o aço CA-50 utilizado nas barras, tela soldada nervurada e malha pré-fabricada, a brita e a madeira aplainada para as formas de concreto. Já na envoltória quantificou-se o vidro e o alumínio empregado nas esquadrias que foram montadas *in loco*, o alumínio de brises e requadros, o granito, o revestimento cerâmico, a argamassa, o cimento e os blocos de concreto.

Para o elemento partições internas foram considerados os blocos de concreto empregados entre uma unidade e outra e nas demais paredes estruturais como o fosso dos elevadores e escadas de incêndio, os tijolos cerâmicos que fazem a repartição interna dos cômodos de cada unidade, o chapisco e o cimento, além das esquadrias de madeira.

No elemento acabamentos internos foram considerados os materiais gerais e materiais de piso, parede e teto, além das bancadas das cozinhas, banheiros e áreas de serviço entregues pela construtora. Os materiais gerais abrangem a argamassa pré-fabricada, colante e refratária. Para o piso foram coletados os dados do contrapiso, porcelanatos, pisos cerâmicos, piso vinílico, rejantes, pintura látex-acrílica e o granito utilizado nas soleiras, filetes, rodapés, peitoris e roda piscina. Já para as paredes considerou-se o granito, porcelanato, revestimento cerâmico, massa PVA, pintura em tinta acrílica e revestimento em massa a base de resina e resíduos de granito

e mármore. Por último, o teto englobou gesso em saco, chapa de gesso acartonado, massa PVA para gesso e pintura em tinta acrílica.

### 3.3.2 Dados de Projeto

Os dados de projeto foram obtidos a partir do orçamento prévio, disponibilizado em formato de planilha, sendo os elementos construtivos classificados em: fundações; estrutura do reservatório inferior; estrutura dos pavimentos do 1º ao 6º (com quantitativos individualizados por pavimento); estrutura da piscina; estrutura do reservatório superior; estrutura do pavimento técnico; estrutura da cobertura; alvenarias e fechamentos (também com quantitativos discriminados por pavimento); esquadrias metálicas e de alumínio; esquadrias e brises em alumínio; vidro; revestimentos de parede, piso, teto e externos; e pintura. A **Figura 20** é um recorte da planilha de orçamento de onde os dados de projeto foram extraídos, os materiais destacados referem-se aos contabilizados para o elemento fundação.

Figura 20- Recorte da planilha de orçamento disponibilizada pela construtora.

SERVIÇOS	QUANT	UNID
<b>FUNDАOES RASAS</b>		
ESCAVACAO MANUAL COM PROFUNDIDADE IGUAL OU INFERIOR A 1,50M	700,38	M <sup>3</sup>
APIOAMENTO DO FUNDO DE VALAS, PARA SIMPLES REGULARIZACAO	269,38	M <sup>2</sup>
LASTRO DE BRITA	53,88	M <sup>3</sup>
ARMADURA EM ACO CA-50	41.533,06	KG
CONCRETO FCK=35,0MPA - USINADO	538,75	M <sup>3</sup>
IMPERMEABILIZACAO DO RESPALDO DA FUNCAO - ARGAMASSA IMPERMEAVEL	161,63	M <sup>3</sup>
REATERRA DE VALAS, INCLUSIVE APIOAMENTO (ancoragem das sapatas)	161,63	M <sup>3</sup>
EQUIPAMENTOS (MUNCK/BOB)	1,00	VB

Fonte: Dados concedidos pela construtora (2023).

Os itens relevantes para o inventário foram transferidos para uma segunda planilha, onde os quantitativos foram organizados conforme os elementos analisados neste estudo: fundação, estrutura, envoltória, partições internas e acabamentos internos. O processo de organização enfrentou alguns desafios, em destaque a falta de descrições detalhadas e especificações dos materiais quantificados, divergências nas unidades de medida utilizadas (posteriormente esclarecidas pela construtora) e a ausência de determinados materiais no orçamento.

O projeto executivo da edificação também foi disponibilizado em arquivo DWG no software Autocad. Com ele foi possível estimar o uso de certos materiais que, apesar de serem utilizados em algum dos elementos analisados, não estavam presentes na planilha de orçamento, a exemplo os blocos de concreto da envoltória.

### 3.3.3 Dados Reais de Obra

Os dados reais da obra correspondem aos quantitativos de materiais efetivamente obtidos dentro do canteiro de obras, acompanhando a construção efetivamente do edifício, coletados ao longo da construção. Para a obtenção desses dados, realizou-se diversas visitas ao canteiro de obras e ao escritório da construtora, buscando obter os dados nos setores responsáveis pelo armazenamento das notas fiscais e os profissionais encarregados, quando necessário.

Esses dados reais trazem informações exclusivas para obter dados concretos das emissões de GEEs, fundamental para o cálculo dos estágios A1-A3. A identificação do fabricante e do fornecedor permitiu quantificar a quilometragem percorrida, com o auxílio do *Google Maps*, para o transporte dos materiais do fabricante ao fornecedor, e do fornecedor ao canteiro de obras, trazendo dados concretos das emissões no estágio A4, onde as distâncias de transporte e o peso total do material transportado são fatores cruciais nos cálculos.

Para o estágio A5, referente aos processos construtivos, as informações das notas fiscais possibilitaram o cálculo das emissões associadas ao consumo de diesel. Isso inclui tanto o combustível utilizado pelo maquinário locado para a obra quanto aquele empregado nos caminhões betoneira para o bombeamento do concreto. Além desses dados obtidos no canteiro de obras, a colaboração da construtora foi essencial para incluir na quantificação das emissões o consumo de energia elétrica, o consumo de água e o transporte de resíduos. Pode-se obter acesso ao controle interno desses insumos, permitindo um levantamento bem preciso. A **Figura 21** apresenta um recorte do controle interno de consumo de água da construtora para a obra da edificação em estudo.

Figura 21 - Consumo de água da obra no ano 2022 e parcial no ano de 2023.

		SISTEMA DE GESTÃO DA QUALIDADE																							
		2022												2023						Acumulado					
OBRA		JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN						
		Nº Empregados	108	120	132	155	144	130	128	133	131	122	121	126	126	138	111	116	68	73	89	87	78	75	<b>2511</b>
		Consumo de Água (m³)	87	95	138	145	163	151	157	147	130	132	116	130	99	157	115	120	107	120	134	296	213	230	<b>3182,0</b>
		Índice de Consumo de Água m³ / trabalhador/ mês	0,8	0,8	1,0	0,9	1,1	1,2	1,2	1,1	1,0	1,1	1,0	1,0	0,8	1,1	1,0	1,0	1,6	1,6	1,5	3,4	2,7	3,1	<b>1,3</b>

Fonte: Dados concedidos pela construtora (2023).

Para garantir a integralidade das informações, todas as notas fiscais relacionadas aos materiais de interesse do estudo foram cuidadosamente fotografadas e organizadas a partir das pastas disponibilizadas no canteiro de obras.

Além das notas fiscais dos materiais, foram também coletados documentos referentes à locação de maquinários utilizados na obra, como mini escavadeira e retroescavadeira, garantindo uma abordagem abrangente na análise das emissões associadas ao processo construtivo. O registro fotográfico dessas notas fiscais foi realizado de maneira sistemática ao longo de visitas ao canteiro de obras, exigindo um esforço para selecionar e documentar cada item. Aproximadamente 400 notas fiscais foram coletadas, representando uma base de dados robusta para a quantificação das emissões embutidas. As **Figuras 22, 23 e 24** ilustram algumas notas fiscais fotografadas ao longo das visitas, evidenciando a variedade e a abrangência das informações obtidas.

Figura 22 - Nota fiscal do material aço obtida no canteiro de obras.

<b>DANFE</b> DOCUMENTO AUXILIAR DA FATURA ELETRÔNICA		0-ENTRADA [ ] 1-SAIDA		CHAVE DE ACESSO	
NATUREZA DA OPERAÇÃO Venda merc.adq.receb.de terceiros.		SÉRIE FOLHA 1/1		Consulta de autenticidade no portal nacional da NF-e www.nfe.fazenda.gov.br/portal ou no site da Sefaz Autorizadora	
INSCRIÇÃO ESTADUAL INSC. ESTADUAL DO SUBST. TRIBUTÁRIO [CNPJ]		PROTÓCOLO DE AUTORIZAÇÃO DE USO		DATA DE EMISSÃO 13.09.2011 DATA INSCRIÇÃO DA 13.09.2011 HORA DA SÉNTE 09:28:10	
DESTINATÁRIO / REMETENTE NOME / RAZÃO SOCIAL ENDERECO		ENDERECO / DISTRITO SETOR NOROESTE PONTO/FAX		UF DF INSCRIÇÃO ESTADUAL	
MUNICÍPIO BRASÍLIA					
FATURA VALIDADE PRAZO FIM		Nº DE ORDEM		VENIMENTO	
CÁLCULO DO IMPOSTO BASE DE CALCULO DO ICMS		VALOR DO ICMS		BASE DE CALCULO ICMS SUBST 0,00	
VALOR DO FRETE 0,00		VALOR DO SEGURO 0,00		VALOR DO ICMS SUBST 0,00	
DESCONTO 0,00		OUTRAS DESPESAS ACESGRIAS 0,00		VALOR TOTAL DOS PRODUTOS 0,00	
VALOR TOTAL DA NOTA 0,00					
TRANSPORTADORES / VOLUMES TRANSPORTADORES RAZÃO SOCIAL		FRETE POR CONTA 0 - EMITENTE		CÓDIGO ANTT	
		MUNICÍPIO BRASÍLIA		PLACA DO VEÍCULO UF CNPJ/CPF DF INSCRIÇÃO ESTADUAL DF	
QUANTIDADE 00005		ESPECIE		INOMERO	
				PESO BRUTO 5.130 KG	
				PESO LÍQUIDO 5.130 KG	
DETALHAMENTO DO PRODUTO/SERVIÇOS					
CÓD. PROD.	DESCRIÇÃO DO PRODUTO / SERVIÇOS	NCM / SH	CST	CIVP	UNID.
	CA50 12,50 MM BARRA RETA VERGALHÃO 12,00 METROS	72142000	000	5102	TO
		5,130		7.048,3099	
				36.157,83	
				36.157,83	
				0,00	
				4.338,94	
				0,00	
				0,00	
				12,00	0,00

Fonte: Dados concedidos pela construtora (2023).

Figura 23 - Nota fiscal do material bloco cerâmico obtida no canteiro de obras.

NATUREZA DA OPERAÇÃO VENDA		INSCRIÇÃO ESTADUAL		INSCRIÇÃO ESTADUAL DO SUBST. TRIBUTARIO		CNPJ/CPP		CHAVE DE ACESSO DA NF-e					
								Consulta de autenticidade no portal nacional da NF-e www.nfe.fazenda.gov.br/portal ou no site da Sefaz Autorizadora					
DESTINATÁRIO/REMETENTE		NOME/RAZÃO SOCIAL		ENDERECO		BAIRRO/DISTRITO		CEP					
								DATA DA EMISSÃO 14/09/2022					
MUNICÍPIO BRASÍLIA		FONE/FAX		UF DF		INSCRIÇÃO ESTADUAL		DATA DE SAÍDA/ENTRADA 15/09/2022					
FATURA								HORA DE SAÍDA 06:00:00					
VALOR POR EXTESSO													
<b>CÁLCULO DO IMPOSTO</b>													
BASE DE CÁLCULO ICMS 0,00		VALOR DO ICMS 0,00		BASE DE CÁLCULO DO ICMS SUBSTITUIÇÃO 0,00		VALOR DO ICMS SUBSTITUIÇÃO 0,00		VALOR TOTAL DOS PRODUTOS					
VALOR DO FRETE 0,00		VALOR DO SEGURO 0,00		DESCONTO 0,00		OUTRAS DESPESAS 0,00		VALOR APROXIMADO DOS TRIBUTOS-Fonte: IBPT 0,00					
VALOR TOTAL DA NOTA 0,00													
<b>TRANSPORTADOR/VOLUMES TRANSPORTADOS</b>													
RAZÃO SOCIAL		FRETE POR CONTA 21		CÓDIGO ANTT		PLACA DO VEÍCULO		UF 34.716.570/0001-33					
ENDERECO		MUNICÍPIO						UF GO					
QUANTIDADE 6916	ESPÉCIE TIJOLOS	MARCA 09X18X19	NUMERAÇÃO		PESO BRUTO		PESO LÍQUIDO						
<b>DADOS DO PRODUTO/SERVIÇOS</b>													
CÓDIGO 001	DESCRIÇÃO DO PRODUTO/SERVIÇO TIJOLO 09 X 19 X19	NCM 69041000	UN UN	CST 0102	CFOP 6101	QUANT. 6.916,00 00	VLR. UNIT. 0,540000	VLR. TOTAL 3.734,64	BC. ICMS 0,00	ALIQ. ICMS 0,00	VLR. ICMS 0,00	ALIQ. IPI 0,00	VLR. IPI 0,00
<b>CÁLCULO DO ISSQN</b>													

Fonte: Dados concedidos pela construtora (2023).

Figura 24 - Nota fiscal de locação de maquinário obtida no canteiro de obras.

NATUREZA DA OPERAÇÃO Locação de Seviço		INSCRIÇÃO ESTADUAL		INSCRIÇÃO ESTADUAL DO SUBST. TRIB.		CNPJ / CPP		CHAVE DE ACESSO				
								Consulta de autenticidade no portal nacional da NF-e www.nfe.fazenda.gov.br/portal ou no site da Sefaz Autorizadora				
DESTINATÁRIO/REMETENTE		RAZÃO SOCIAL		ENDERECO		BAIRRO/DISTRITO		MUNICÍPIO				
						SETOR NOROESTE						
MUNICÍPIO Brasília		FONE/FAX		UF DF		INSCRIÇÃO ESTADUAL		UF DF				
CURA								HORA DE ENTRADA/SAÍDA 09:13				
<b>CÁLCULO DO IMPOSTO</b>												
BASE DE CÁLCULO DO ICMS 0,00		VALOR DO ICMS 0,00		BASE DE CÁLCULO DO ICMS ST 0,00		VALOR DO ICMS ST 0,00		VALOR TOTAL DOS PRODUTOS 0,00				
VALOR DO FRETE 0,00		VALOR DO SEGURO 0,00		DESCONTO 0,00		OUTRAS DESPESAS ACESORIAS 0,00		VALOR DO IPI 0,00				
VALOR TOTAL DA NOTA 0,00												
<b>TRANSPORTADOR/VOLUMES TRANSPORTADOS</b>												
RAZÃO SOCIAL		FRETE POR CONTA 9 - Sem Frete		CÓDIGO ANTT		PLACA DO VEÍCULO		UF CNPJ/CPF				
ENDERECO		MUNICÍPIO						UF INSCRIÇÃO ESTADUAL				
QUANTIDADE	ESPÉCIE	MARCA	NUMERAÇÃO		PESO BRUTO		PESO LÍQUIDO					
<b>DADOS DO PRODUTO/SERVIÇO</b>												
CÓDIGO 0001	DESCRIÇÃO DO PRODUTO/SERVIÇO LOCAÇÃO BOBCAT	NCM/SH 00	CST 5933	UNID. UN	QTD. 1.0000	VLR. UNIT. 0,00	VLR. TOTAL 0,00	BC. ICMS 0,00	VLR. ICMS 0,00	ALIQ. ICMS 0,00	ALIQ. IPI 0,00	VLR. IPI 0,00

Fonte: Dados concedidos pela construtora (2023).

Mesmo após a fotografia de todas as notas fiscais referentes ao concreto e à brita, foi necessária uma visita adicional ao escritório da construtora para uma análise mais detalhada da destinação desses materiais. A diferenciação entre os volumes utilizados na fundação e na

estrutura da edificação não estava explicitamente clara apenas com as informações contidas nas notas fiscais, tornando essencial um aprofundamento nessa etapa da coleta de dados.

Durante a visita, foi concedido acesso aos arquivos internos da construtora, incluindo o documento denominado controle do volume de concreto e o controle de concretagem (**Figura 25**). Esses registros foram fundamentais para quantificar com precisão os volumes reais de concreto e brita empregados em cada etapa da obra. Com essas informações complementares, foi possível obter uma segmentação mais precisa da aplicação dos materiais, garantindo maior confiabilidade na análise das emissões embutidas e na modelagem do inventário de ciclo de vida por elemento da edificação analisada.

Figura 25 - Página do controle de volume de concreto da obra.

CONTROLE DO VOLUME DE CONCRETO												
obra:	ca	data	fck	romaneio	caminhão	Slump	brita	peças concretadas	volumem m³	Tipo de concretagem	FCK28	Nº fiscal
m	28/jun	35 Mpa	26164	233	12+2	81	magro	10,00 m³	convencional	****		
m	28/jun	35 Mpa	26166	222	12+2	81	magro	10,00 m³	convencional	****		
m	28/jun	35 Mpa	26168	150	12+2	81	magro	10,00 m³	convencional	****		
m	28/jun	35 Mpa	26170	221	12+2	81	magro	10,00 m³	convencional	****		
m	28/jun	35 Mpa	26186	226	12+2	81	magro	10,00 m³	convencional	****		
m	28/jun	35 Mpa	26187	144	12+2	81	magro	10,00 m³	convencional	****		
m	28/jun	35 Mpa	26188	232	12+2	81	magro	10,00 m³	convencional	****		
m	28/jun	35 Mpa	26194	237	12+2	81	magro	10,00 m³	convencional	****		
m	28/jun	35 Mpa	26201	120	12+2	81	magro	10,00 m³	convencional	****		
m	28/jun	35 Mpa	26205	150	12+2	81	magro	10,00 m³	convencional	****		
m	28/jun	35 Mpa	26218	151	12+2	81	magro	10,00 m³	convencional	****		
m	28/jun	35 Mpa	26220	228	12+2	81	magro	10,00 m³	convencional	****		
m	28/jun	35 Mpa	26222	222	12+2	81	magro	10,00 m³	convencional	****		
m	28/jun	35 Mpa	26224	140	12+2	81	magro	10,00 m³	convencional	****		
m	28/jun	35 Mpa	26225	237	12+2	81	magro	10,00 m³	convencional	****		
m	28/jun	35 Mpa	26226	153	12+2	81	magro	10,00 m³	convencional	****		
m	02/jul	25 Mpa	26359	226	14+2	81	magro	10,00 m³	convencional	****		
m	02/jul	25 Mpa	26371	226	14+2	81	magro	10,00 m³	convencional	****		
m	02/jul	25 Mpa	26375	233	14+2	81	magro	3,00 m³	convencional	****		
t	06/jul	35 Mpa	26490	226	12+2	81	Sapata	10,00 m³	bombeado	44,70 MPA		
t	06/jul	35 Mpa	26493	220	12+2	81	Sapata	10,00 m³	bombeado	44,60 MPA		
t	06/jul	35 Mpa	26496	222	12+2	81	Sapata	10,00 m³	bombeado	36,90 MPA		
t	05/jul	35 Mpa	26502	233	12+2	81	Sapata	10,00 m³	bombeado	37,20 MPA		
t	06/jul	25 Mpa	26514	220	14+2	81	magro	10,00 m³	bombeado	****		
t	13/jul	35 Mpa	107708	231	12+2	81	Sapata	10,00 m³	bombeado	31,60 MPA		
t	13/jul	35 Mpa	107713	225	12+2	81	Sapata	10,00 m³	bombeado	43,30 MPA		
t	13/jul	35 Mpa	107729	155	12+2	81	Sapata	3,00 m³	bombeado	36,80 MPA		
m	13/jul	25 Mpa	107733	232	10+2	81	magro	6,00 m³	bombeado	****		
t	16/jul	35 Mpa	107905	236	12+2	81	Sapata	10,00 m³	bombeado	31,80 MPA		
t	16/jul	35 Mpa	107906	224	12+2	81	Sapata	10,00 m³	bombeado	38,20 MPA		
t	16/jul	35 Mpa	107908	149	12+2	81	Sapata	10,00 m³	bombeado	38,60 MPA		
t	16/jul	35 Mpa	107917	154	12+2	81	Sapata	10,00 m³	bombeado	24,30 MPA		
t	16/jul	35 Mpa	107930	225	12+2	81	Sapata	5,00 m³	bombeado	41,50 MPA		
t	20/jul	35 Mpa	26992	226	12+2	81	viga baldrame	10,00 m³	bombeado	39,90 MPA		
t	20/jul	35 Mpa	26996	219	12+2	81	viga baldrame	8,00 m³	bombeado	40,70 MPA		
t	20/jul	35 Mpa	27001	139	12+2	81	viga baldrame	4,00 m³	bombeado	37,70 MPA		
m	20/jul	25 Mpa	27004	144	2	81	magro	10,00 m³	bombeado	****		
m	20/jul	25 Mpa	27009	144	2	81	magro	10,00 m³	bombeado	****		
t	24/jul	35 Mpa	108364	223	12+2	81	viga baldrame	10,00 m³	bombeado	39,20 MPA		
t	24/jul	35 Mpa	108366	232	12+2	81	Sapata	10,00 m³	bombeado	36,40 MPA		
t	24/jul	35 Mpa	108370	235	12+2	81	Sapata	10,00 m³	bombeado	38,90 MPA		
t	24/jul	35 Mpa	108381	143	12+2	81	Sapata	10,00 m³	bombeado	42,10 MPA		
t	24/jul	35 Mpa	108395	146	12+2	81	Sapata	5,00 m³	bombeado	43,60 MPA		
m	26/jul	35 Mpa	27228	217	12+2	81	magro	3,00 m³	convencional	****		
t	27/jul	35 Mpa	108489	154	12+2	81	Sapata	10,00 m³	bombeado	38,50 MPA		
t	27/jul	35 Mpa	108495	151	12+2	81	Sapata	10,00 m³	bombeado	43,90 MPA		
t	27/jul	35 Mpa	108509	143	12+2	81	pescoco sapata	10,00 m³	bombeado	43,70 MPA		
t	27/jul	35 Mpa	108517	149	12+2	81	pescoco sapata	10,00 m³	bombeado	43,70 MPA		
m	27/jul	35 Mpa	108538	235	12+2	81	magro	4,00 m³	bombeado	37,30 MPA		

Fonte: Dados concedidos pela construtora (2023).

Após a conclusão da etapa de coleta de documentação, todas as fotografias das notas fiscais e demais arquivos foram organizados em formato digital, categorizados por tipo de material. Esse processo de sistematização foi essencial para garantir a acessibilidade e a

confiabilidade dos dados, além de facilitar sua posterior utilização na estruturação do Inventário de Ciclo de Vida da edificação.

Os quantitativos de cada material foram lançados em uma planilha, estruturada de forma a permitir uma análise organizada e coerente das informações. Esse procedimento teve como principal objetivo viabilizar a padronização dos dados, assegurando sua consistência e facilitando a integração com o inventário da edificação. A planilha também serviu como uma ferramenta fundamental para a verificação e o cruzamento de informações, garantindo maior precisão na quantificação dos insumos e na avaliação das emissões embutidas associadas à construção.

O **Quadro 9** sintetiza os principais dados coletados a partir dos documentos acessados pela autora, destacando de forma organizada a origem das informações, o tipo de documento que as forneceu e o respectivo estágio do ciclo de vida beneficiado pela análise.

Quadro 8 - Dados coletados por estágio analisado segundo o tipo de documento.

<b>Estágio do ciclo de vida</b>	<b>Tipo de documento</b>	<b>Dados reais coletados</b>
A1-A3	Notas fiscal	Nome do material; Especificação do material; Quantitativo real do material utilizado na construção.
A1-A3	Arquivos de controle interno da construtora	Volume de concreto e brita destinados a fundação; Volume de concreto e brita destinados à estrutura.
A4	Notas fiscais	Fabricante e local de fabricação do produto; Endereço do fornecedor do produto; Peso total transportado por material.
A4	<i>Google Maps</i>	Distância entre fabricante e fornecedor do material; Distância do fornecedor até o canteiro de obras.
A5	Notas fiscais	Especificação do maquinário locado (consumo médio de diesel por tipo de maquinário); Quantitativo de horas em funcionamento por maquinário (consumo de diesel); Número de caminhões betoneira para bombeamento de concreto (consumo de diesel).
A5	Arquivos de controle interno da construtora	Consumo de água no canteiro de obras; Consumo de energia elétrica no canteiro de obras; Volume de resíduos gerados no canteiro de obras – transporte de resíduos (consumo de diesel).

### 3.3.4 Modelagem do Inventário de Ciclo de Vida

A modelagem do ICV feita no *Excel*, considerando dados de projeto e dados reais de obra, foram desenvolvidas em três planilhas. A primeira apresenta as emissões de carbono dos estágios A1-A3, a segunda quantifica as emissões do estágio A4 e a terceira do estágio A5.

#### 3.3.4.1 Inventário de Ciclo de Vida dos Estágios A1-A3

A primeira planilha foi estruturada em três módulos principais: quantitativo de materiais, categoria de impacto e resultados. Para cada elemento da edificação inventariado foi preenchida uma tabela separada, totalizando 5 tabelas. No módulo 1 foram inseridas o nome do material, sua respectiva descrição, quantitativo dos materiais obtido a partir dos dados de projeto e dos dados reais de obra e a unidade de medida de cada material.

No módulo 2, além da identificação da categoria de impacto analisada (Mudanças Climáticas - PAG), foram inseridos os valores numéricos do fator de carbono de cada material (FC), sua respectiva unidade de medida e a fonte de origem desse fator, proveniente de DAPs, Ecoinvent ou Sidac.

Por fim, o módulo 3 apresenta os resultados obtidos para cada material, diferenciados conforme a fonte de dados utilizada, sendo expostos os resultados correspondentes aos dados de projeto e dados reais, expressos em kg CO<sub>2</sub>-eq. Ademais, este módulo apresenta o percentual de participação nas emissões totais de cada material do elemento inventariado. A **Figura 26** apresenta a estrutura criada para a primeira planilha e exemplifica seu preenchimento para o item concreto.

Figura 26 - Modelo de tabela da primeira planilha de avaliação do ICV dos estágios A1-A3 por elemento da edificação.

ELEMENTO FUNDAÇÃO: Estágio A1 - A3								
QUANTITATIVO DE MATERIAL						CATEGORIA DE IMPACTO		
MATERIAL	DESCRIÇÃO	DADOS DE PROJETO		DADOS REAIS DE OBRA		MUDANÇAS CLIMÁTICAS (PAG)		
		Qtd.	Und.	Qtd.	Und.	FC	Und.	Fonte
Concreto	Concreto Usinado FCK=40 MPA (2400KG/m³)	538,75	m³	984,50	m³	305,00	kgCO <sub>2</sub> eq/m³	EPD Votorantim Cimentos Brasil (2023 - 2028): Concreto FCK 40.

ELEMENTO FUNDAÇÃO: Estágio A1 - A3				
RESULTADOS				
RESULTADOS PARA MUDANÇAS CLIMÁTICAS PAG)				
Dados de Projeto	Dados Reais de Obra	Und.	Participação nas Emissões Totais (%)	Participação nas Emissões Totais (%)
164.318,75	300.272,50	kgCO <sub>2</sub> -eq	x %	y %

Continuação da tabela: Planilha I



Após o preenchimento dos módulos 1 e 2 os resultados da quantificação da emissão de GEEs da produção de cada material (EP) referente aos estágios A1-A3 (segundo a EN 15978:2011 e a EN 15804:2019) são obtidos a partir da somatória dos principais materiais empregados na obra (concreto, argamassa, blocos cerâmicos, etc.) multiplicados pelos seus respectivos fatores de carbono (FC), aplicando a equação 1:

$$EP = \sum_{i=0}^t (QM_i \times FCi) \quad (Equação 1)$$

Onde:

$EP$  = Emissão de GEEs da produção dos materiais (kg CO<sub>2</sub>-eq/obra)

$QM_i$  = Quantitativo do material “i” empregado no canteiro, sem perdas (unidade/obra).

Ex. 50 m<sup>3</sup> de concreto /obra.

$FCi$  = Fator de carbono do material “i” (kg CO<sub>2</sub>-eq/unidade material).

Para todos os materiais foi possível encontrar um fator de impacto, seja no EPDs, Ecoinvent ou SIDAC, dando preferência para fatores brasileiros ou globais. Exceção foi para o revestimento à base de resina com resíduos de granitos e mármores e o revestimento pedra esculpida presentes no elemento acabamentos internos, cujo fator de carbono foi utilizado o mesmo do granito por conter resíduos de pedras naturais em suas composições, e para as portas prontas, contabilizadas no elemento partições internas, cujo único EPD encontrado é proveniente da Turquia. A **Tabela 1** apresenta todos os fatores de carbono adotados nos cálculos dos estágios A1-A3 para cada material quantificado no inventário deste estudo.

Tabela 1 - Fator de carbono adotado para os materiais inventariados do estágio A1 ao A3.

Material	U.M	<i>Fci</i> (kg CO <sub>2</sub> -eq/U.M)	Fonte
Aço	ton	1620,000	EPD ArcelorMittal Brasil (2019).
Alumínio	ton	2.661,00	ABAL Brasil 2010
Argamassa pré-fabricada	ton	155,000	EPD Votorantim Brasil: Argamassa ARV III (2024).
Argamassa colante	ton	142,00	EPD Brasil Votorantim: Argamassa (2024).
Argamassa refratária	kg	0,440	EPD <i>Webertec Refract</i> Saint-Gobain Portugal (2024 - 2029)
Bloco cerâmico	kg	0,235	<i>Ecoinvent Calcined Clay BR</i> (2023).
Bloco de concreto	kg	0,067	<i>Ecoinvent Concrete block BR</i> (2023).
Brita	kg	0,005	<i>Ecoinvent Gravel Crushed BR</i> (2023).
Chapa de gesso acartonado	m <sup>2</sup>	1,670	EPD Placo Saint-Gobain: <i>Plasterboard</i> Brasil (2024-2029).
Chapisco	m <sup>3</sup>	384,600	SIDAC Argamassa dosada em obra 1:3 (2027)
Cimento	ton	384,000	EPD Votorantim Brasil: Cimento CP III (2023 – 2028).
Concreto	m <sup>3</sup>	305,000	EPD Votorantim Cimentos Brasil: Concreto FCK 40 (2023 - 2028).
Contrapiso	ton	187,000	EPD Votorantim Brasil: Argamassa 4201 Matrix Contrapiso (2024).
Esmalte sintético	kg	3,010	EPD Weber Solvent based products Saint-Gobain (2023 - 2028)
Gesso em saco	kg	0,236	EPD <i>Knauf Global Standard Plaster</i> (2019-2029).
Granito	kg	0,963	<i>Ecoinvent Natural stone plate, polished</i> (2023).
Madeira	m <sup>3</sup>	2,220	<i>Ecoinvent</i> 2023.
Massa corrida PVA: paredes.	kg	0,662	EPD <i>IsomatAcrylic Render Global</i> (2019-2028).
Massa PVA para gesso	m <sup>2</sup>	0,390	EPD <i>KNAUF Ready-to-use finishing Plaster products for interior use</i> (2023 - 2028).
Piso vinílico	m <sup>2</sup>	5,930	EPD Tarkett Brasil: <i>LVT Gluedown</i> (2024 – 2030).

Porcelanato	m <sup>2</sup>	11,600	EPD <i>Porcelain tiles Graniser Ceramics Global</i> (2027).
Porta pronta	m <sup>2</sup>	1,350	EPD <i>Kastamonu Door Panel Turquia</i> (2026).
Rejunte	kg	0,634	EPD <i>Isomat Grouts Global</i> (2022-2027).
Revestimento cerâmico	m <sup>2</sup>	3,370	ANFACER Brasil (2016).
Revestimento à base de resina com resíduos de granitos e mármores	kg	0,963	<i>Ecoinvent Natural stone plate, polished</i> (2023).
Revestimento Pedra Esculpida	kg	0,963	<i>Ecoinvent Natural stone plate, polished</i> (2023).
Tinta acrílica	m <sup>2</sup>	2,980	EPD Sherwin-Williams Global (2021 - 2026)
Tinta látex-acrílica: piso	m <sup>2</sup>	2,190	EPD <i>PPG Industries Epoxy coating</i> (EUA) (2023 - 2028).
Vidro 10mm	m <sup>2</sup>	30,300	EPD Brasil Cebrace Vidros de Proteção Solar (2022 – 2027).
Vidro 8mm	m <sup>2</sup>	24,200	EPD Brasil Cebrace Vidros de Proteção Solar (2022 – 2027).

### 3.3.4.2 Inventário de Ciclo de Vida do Estágio A4

Para calcular as emissões provenientes do estágio A4 foi desenvolvida a segunda planilha com 4 módulos: quantitativo de material por fonte de dados, quantitativo de quilometragem, categoria de impacto e resultados. O módulo 1 é composto pelo nome do fabricante do material, o fornecedor do material, nome do material, o quantitativo em quilos e em toneladas.

No módulo 2 a quilometragem percorrida do fabricante ao fornecedor e do fornecedor ao canteiro de obras é quantificada, bem como a multiplicação da massa do material em toneladas pela somatória total das distâncias (fabricante ao fornecedor, fornecedor a obra), expressa em t.km (toneladas por quilometro).

O módulo 3 apresenta o fator de carbono do transporte rodoviário ( $FC_t$ ) para o estágio A4, bem como sua unidade e base de dados de origem. O fator de carbono do transporte rodoviário adotado neste estudo para o estágio A4 é indicado na **Tabela 2**.

Tabela 2 - Fator de carbono do transporte rodoviário.

$FC_t$	U.M	Fonte
0,396	kg CO <sub>2</sub> -eq/t.km	<i>Ecoinvent 2023 (Transport, truck 10-20t, 50%LF, empty return/GLO Mass)</i>

Por último, no módulo 4, os resultados são obtidos em kg CO<sub>2</sub>-eq. A **Figura 27** detalha a estrutura criada para a tabela da segunda planilha e exemplifica seu preenchimento com dados reais para o material aço.

Figura 27 - Modelo de planilha utilizada para cálculo do ICV do estágio A4.

ELEMENTO FUNDAÇÃO: Estágio A4														
QUANTITATIVO DE MATERIAL DADOS REAIS DE OBRA							QUANTITATIVO QUILOMETRAGEM							
FABRICANTE	FORNECEDOR	MATERIAL	Qtd.	Und.	Qtd.	Und.	DIST. Fabricante Fornecedor	Und.	DIST. Fornecedor Obra	Und.	Distância Total de Transporte (Di)	Und.	Massa (ton) x Distância Total de Transporte	Und.
-	-	Aço	38.180,00	kg	38,2	ton	963,00	km	12,00	km	975,00	km	37.225,50	t.km

ELEMENTO FUNDAÇÃO: Estágio A4														
MUDANÇAS CLÍÁTICAS (PAG)					RESULTADOS PARA MUDANÇAS CLIMÁTICAS (PAG)									
Fct	Und.	FONTE	Dados Reais de Obra	Und.	Participação nas Emissões Totais (%)									
0,39596	kgCO <sub>2</sub> eq/ t.km	Ecoinvent 2023 (Transport, truck 10-20t, EURO3, 50%LF, empty return/GLO Mass)	14.739,78	kgCO <sub>2</sub> eq	100,00%									

Continuação  
da tabela  
Planiilha II

A quantificação da emissão de GEEs do transporte dos materiais (ET) da etapa A4 (segundo a EN 15978:2011 e a EN 15804:2019) ocorre a partir da massa (em toneladas) de cada material empregado na obra (concreto, argamassa, blocos cerâmicos, etc.) multiplicados pela distância transportada (em km) do local de produção do material ao fornecedor e do fornecedor até a entrega ao canteiro de obras, considerando transporte rodoviário, aplicando a equação 2.

$$ET = \sum_{i=0}^t (M_i \times D_i \times Fct) \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

$ET$  = Emissão de GEEs do transporte dos materiais (kg CO<sub>2</sub>-eq /obra).

$M_i$  = Massa do material “i” transportado para o canteiro, sem perdas (t – toneladas/obra).

$D_i$  = Distância de transporte do material “i” (km). Considerou-se a distância entre 3 pontos: fabricante ao fornecedor e fornecedor ao canteiro de obras.

$FCt$  = Fator de carbono do transporte rodoviário (kg CO<sub>2</sub>-eq /t.km). Foi considerado o transporte rodoviário com capacidade de 16-32 toneladas.

Foram utilizados dados reais e de projeto, sendo utilizadas as mesmas informações de fabricantes, fornecedores e distâncias provenientes dos dados reais.

### 3.3.4.3 Inventário de Ciclo de Vida do Estágio A5

A quantificação das emissões GEEs dos processos construtivos, denominado estágio A5, resultou da soma de cinco componentes: consumo de eletricidade no canteiro de obras, uso de água no canteiro, combustíveis empregados nas operações do canteiro, transporte dos resíduos gerados para sua destinação final e emissões associadas às concretagens realizadas no canteiro (kg CO<sub>2</sub>-eq/obra), conforme expressa a Equação 3.

$$EC = E_{ele} + E_{agu} + E_{com} + E_{tre} + E_{con} \quad (Equação\ 3)$$

Onde:

$EC$  = Emissão de GEEs da construção (kg CO<sub>2</sub>-eq /obra).

$E_{ele}$  = Emissão de GEEs da eletricidade utilizada no canteiro (kg CO<sub>2</sub>-eq/obra).

$E_{agu}$  = Emissão de GEEs da água utilizada no canteiro (kg CO<sub>2</sub>-eq/obra).

$E_{com}$  = Emissão de GEEs dos combustíveis utilizados no canteiro (kg CO<sub>2</sub>-eq/obra).

$E_{tre}$  = Emissão de GEEs do transporte para destinação final dos resíduos gerados no canteiro (kg CO<sub>2</sub>-eq/obra).

$E_{con}$  = Emissão de GEEs das concretagens realizadas no canteiro (kg CO<sub>2</sub>-eq/obra).

A planilha para o estágio A5 consta dos itens emissão de GEEs da eletricidade utilizada no canteiro ( $E_{ele}$ ), emissão de GEEs da água utilizada no canteiro ( $E_{agu}$ ), emissão de GEEs dos combustíveis utilizados no canteiro ( $E_{com}$ ), emissão de GEEs do transporte para destinação final dos resíduos gerados no canteiro ( $E_{tre}$ ) e emissão de GEEs das concretagens realizadas no canteiro ( $E_{con}$ ), sendo os resultados finais apresentados em kg CO<sub>2</sub>-eq.

O consumo de eletricidade, medido em Kwh, foi obtido entre os anos de 2022 e 2023 no canteiro de obras. A **Tabela 3** apresenta o fator de carbono da eletricidade brasileira ( $FC_{ele}$ ) utilizado no estudo.

Tabela 3 - Fator de carbono da eletricidade.

<b><math>FC_{ele}</math></b>	<b>U.M</b>	<b>Fonte</b>
------------------------------	------------	--------------

0,220	kg CO <sub>2</sub> -eq /kWh	<i>Ecoinvent 2023 (Electricity, medium voltage - BR Mid-western grid).</i>
-------	-----------------------------	--

O resultado das emissões provenientes do consumo de eletricidade foi obtido através da equação 3.1:

$$E_{ele} = q_{ele} \times FC_{ele} \quad (\text{Equação 3.1})$$

Onde:

$E_{ele}$  = Emissão de GEEs da eletricidade consumida no canteiro (kg CO<sub>2</sub>-eq/obra)

$q_{ele}$  = Quantidade de eletricidade total consumida no canteiro (kWh).

$FC_{ele}$ = Fator de carbono da eletricidade brasileira (kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh).

Os dados do consumo de água ( $E_{agu}$ ), obtido em kg, foi obtido no canteiro de obras entre os anos de 2022 e 2023, sendo o fator de carbono da água utilizado na **Tabela 4**.

Tabela 4 - Fator de carbono da água.

<b><i>FC<sub>agu</sub></i></b>	<b>U.M</b>	<b>Fonte</b>
0,00019	kg CO <sub>2</sub> -eq /kg	<i>Ecoinvent 2023 (Tap water tap water production, conventional treatment - BR).</i>

Para o cálculo das emissões geradas pelo consumo de água no canteiro de obras foi realizado aplicada a equação 3.2:

$$E_{agu} = q_{agu} \times FC_{agu} \quad (\text{Equação 3.2})$$

Onde:

$E_{agu}$  = Emissão de GEEs da água consumida no canteiro (kg CO<sub>2</sub>-eq/obra)

$q_{agu}$  = Quantidade de água total consumida no canteiro (kg).

$FC_{agu}$ = Fator de carbono da água brasileira (kg CO<sub>2</sub>-eq/kg).

O consumo de diesel ( $E_{com}$ ) foi baseado no uso da mini escavadeira e retroescavadeira, sendo considerado os itens maquinário, consumo de diesel, categoria de impacto e resultados. O nome do maquinário e as horas totais da máquina em uso no canteiro foram obtidos nas notas fiscais de locação.O consumo médio de diesel adotado para cada máquina é apresentado na **Tabela 5**, medido em litros, obtido pela quantidade de horas de uso multiplicada pelo consumo médio, dada em MJ, considerando a correspondência de 36 MJ por litro.

Tabela 5 - Consumo de diesel por maquinário.

Maquinário	Consumo médio de diesel (litros/hora)
Mini escavadeira	5,90
Retroescavadeira	7,48

O fator de carbono do combustível ( $FC_{com}$ ) foi obtido pelo consumo de diesel, cujo valor é apresentado na **Tabela 6**.

Tabela 6 - Fator de carbono do combustível diesel adotado neste estudo.

$FC_{com}$	U.M	Fonte
0,086	kg CO <sub>2</sub> eq/MJ	Ecoinvent 2023 (Diesel, burned in building machine - GLO).

Para determinar os resultados em kg CO<sub>2</sub>-eq foi empregada a equação 3.3:

$$E_{com} = \sum_{i=0}^t (q_{com,i} \times FC_{com,i}) \quad (\text{Equação 3.3})$$

Onde:

$E_{com}$  = Emissão de GEEs dos combustíveis consumidos no canteiro (kg CO<sub>2</sub>-eq/obra)

$q_{com,i}$  = Quantidade de combustível totais consumidos no canteiro (unidade do combustível).

$FC_{com,i}$  = Fator de carbono do combustível “i” empregado (kg CO<sub>2</sub>-eq/unidade). Foi considerado apenas o diesel com fator de 0,086 kg CO<sub>2</sub>-eq/MJ.

Assim como para eletricidade e água, os dados utilizados para quantificar as emissões relacionadas ao transporte para a destinação final dos resíduos gerados na obra foram fornecidos pela construtora. Foram quantificadas as emissões de GEEs provenientes do transporte de entulho, metal, madeira, plástico, papel e papelão, além de resíduos perigosos.

As emissões de transporte de resíduos ( $E_{tre}$ ) foram organizados inserindo o nome da empresa responsável pela destinação, categoria de resíduo e a quantidade transportada do mesmo em toneladas, e ainda as distâncias entre os pontos, considerando dois cenários, dependendo da empresa responsável pelo resíduo: no primeiro considera a distância entre a empresa responsável pela coleta e o canteiro de obras, quando a destinação final do resíduo ocorre na própria empresa de reciclagem; e o segundo considera a distância entre a empresa responsável pela coleta e o canteiro de obras, seguida pela distância do canteiro até o descarte final, quando o material não é reciclado.

Para os resíduos de metal, madeira, plástico, papel e papelão, adotou-se o primeiro cenário, pois esses materiais foram destinados à reciclagem. Este também foi considerado para os resíduos perigosos, uma vez que a empresa responsável realiza o descarte em sua própria localidade. Para o entulho foi utilizado o segundo cenário, visto que a empresa responsável coleta o resíduo no canteiro de obras e o descarta na Unidade de Recebimento de Entulho (URE) do Distrito Federal.

O fator de carbono do transporte rodoviário ( $FC_t$ ) é apresentado na **Tabela 7**.

Tabela 7 - Fator de carbono do transporte rodoviário.

<b><math>FC_t</math></b>	<b>U.M</b>	<b>Fonte</b>
0,396	kg CO <sub>2</sub> eq/t.km	<i>Ecoinvent 2023 (Transport, truck 10-20t, EURO3, 50%LF, empty return/GLO Mass)</i>

O cálculo das emissões do transporte de resíduos é apresentado na equação 3.4, obtido pela massa total de cada resíduo multiplicada pela distância correspondente e o fator de carbono do transporte.

$$E_{tre} = \sum_{i=0}^t (M_{res,i} \times D_{res,i} \times FC_t) \quad (\text{Equação 3.4})$$

Onde:

$E_{tre}$  – Emissão de GEEs do transporte para destinação final dos resíduos gerados no canteiro (kg CO<sub>2</sub>-eq/obra).

$M_{res,i}$  – Massa do resíduo “i” gerado no canteiro (t – toneladas/obra).

$D_{res,i}$  – Distância de transporte para a destinação final do resíduo “i” gerado no canteiro (km).

$FC_t$  – Fator de carbono do transporte rodoviário (kgCO<sub>2</sub>-eq/t.km). Foi considerado o transporte rodoviário com capacidade de 16-32 toneladas.

A quantificação das emissões do estágio A5 ( $E_{con}$ ) considera as emissões provenientes do uso de combustível diesel pelos caminhões betoneiras na concretagem. A tabela foi preenchida com o número de caminhões, a permanência estimada de cada um em minutos, sendo adotado cerca de 20 minutos por caminhão, o tempo total em horas, o consumo total de diesel, sendo adotado 5,3 litros de diesel por hora. O fator de carbono do diesel, em kgCO<sub>2</sub>-eq/MJ, é apresentado na **Tabela 8**. O resultado das emissões é obtido em MJ, considerando a correspondência de 36 MJ por litro.

Tabela 8 - Fator de carbono do diesel.

<b>FC<sub>t</sub></b>	<b>U.M</b>	<b>Fonte</b>
0,086	kg CO <sub>2</sub> eq/MJ	<i>Ecoinvent 2023</i>

As emissões referentes ao uso do diesel pelos caminhões betoneiras para concretagem é obtida pela equação 3.5:

$$E_{con} = \left( \left( \frac{Q_{con} \times T_{cam}}{60} \times C_{cam} \right) \times 36 \right) \times FC_{dis} \quad (Equação\ 3.5)$$

Onde:

$E_{con}$  = Emissão de GEEs referente as concretagens.

$Q_{cam}$  = Quantidade de caminhões betoneira por concretagem.

$T_{cam}$  = Tempo médio de permanência cada caminhão betoneira na obra (em minutos).

Foi considerado 20 minutos.

$C_{cam}$  = Consumo médio horário de diesel do caminhão betoneira (em L/h). Foi considerado 5,3 L/h.

$FC_{dis}$  = Fator de carbono do diesel (kg CO<sub>2</sub>-eq/MJ). Foi considerado o fator de 0,086 kg CO<sub>2</sub>-eq/MJ.

A construção civil é constituída por estágios de ciclo de vida do projeto, sendo capturado os impactos das emissões desde a fase da extração da matéria prima, transporte, fabricação e construção. A presente pesquisa apresenta dados obtidos a partir do levantamento do consumo efetivo de material de cada fase acompanhada dentro do canteiro de obras durante a fase construtiva, cujo edifício representa o modelo padrão do plano piloto de Brasília, composto por seis pavimentos e pilotis.

## CAPÍTULO IV

### Resultados e Discussão

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na busca pela redução das emissões associados ao ciclo de vida das edificações, a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) mostra-se eficaz e amplamente utilizada (Röck *et al.*, 2020; Melo *et al.*, 2023). Com o objetivo de aplicar a metodologia e apresentar dados coletados in loco, obtidos através do acompanhando a fase construtiva de um edifício de seis pavimentos em Brasília, foram inventariadas suas emissões.

Com base no projeto executivo e nos dados coletados diretamente no canteiro de obras, foram selecionadas para a aplicação da ACV as seguintes partes da edificação: fundação, estrutura, envoltória, partições internas e acabamentos internos. Os materiais com maior representatividade no quantitativo levantado foram escolhidos para o estudo, enquanto materiais de menor quantidade ou que contribuem com uma porcentagem muito pequena nas emissões totais de GEEs foram descartados.

A seguir as emissões provenientes de cada elemento da edificação serão apresentadas e analisadas, bem como o PAG total das edificações, sendo esses resultados obtidos tanto com dados de projeto quanto com os dados reais de obra dentro da categoria de impacto “Mudanças Climáticas” (PAG), em inglês *Global Warming Potential (GWP)*.

### 4.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA EDIFICAÇÃO

A discussão dos resultados obtidos neste estudo inicia-se com a análise dos quantitativos de materiais coletados, tanto a partir dos dados de projeto quanto dos dados reais de obra. Essa análise é essencial, pois revelou diversas diferenças, algumas consideráveis, ao comparar os valores provenientes de cada uma das fontes.

A **Tabela 9** apresenta os quantitativos finais dos materiais, obtidos a partir do processo de coleta e organização dos dados para a quantificação das emissões embutidas de carbono nos estágios A1-A3, relativos a cada elemento da edificação em análise. Nesta tabela, é possível identificar os materiais ausentes, denominados como não consta.

Além disso, são evidenciadas discrepâncias significativas entre os quantitativos registrados nos dados de projeto e nos dados reais de obra, diferenças que impactam diretamente o cálculo das emissões de GEEs.

Tabela 9 – Quantitativo de cada material inventariado para dados de projeto e obra

	Material	Dados de Projeto	Dados de obra	U.M
Fundação	Concreto fck 40 MPa	538,750	984,500	m <sup>3</sup>
	Aço CA-50	37,610	38,180	ton
	Brita	121.624,000	662.262,000	kg
Estrutura	Concreto fck 40 MPa	5.078,020	5.611,000	m <sup>3</sup>
	Aço CA-50	492,400	498,200	ton
	Brita	8.473.660,000	9.285.445,000	kg
	Madeira aplainada plastificada para forma de concreto	484,440	501,250	m <sup>3</sup>
Envoltória	Vidro 8mm	5.034,280	2.271,087	m <sup>2</sup>
	Vidro 10mm	120,660	<b>Não consta</b>	m <sup>2</sup>
	Alumínio Esquadrias	34,269	39,446	ton
	Alumínio Brises	5,664	7,495	ton
	Alumínio requadros	1,351	0,600	ton
	Granito	84.454,000	195.137,400	kg
	Argamassa pré-fabricada	54,426	79,252	ton
	Cimento	23,625	28,048	ton
	Revestimento Cerâmico	280,000	42,380	m <sup>2</sup>
	Bloco de Concreto	48.760,000	68.400,000	kg
Partições Internas	Bloco de Concreto	<b>Não consta</b>	925.363,200	kg
	Bloco Cerâmico	920.308,500	505.898,000	kg
	Chapisco	<b>Não consta</b>	17,750	m <sup>3</sup>
	Cimento	<b>Não consta</b>	78,140	ton
	Portas prontas	551,880	554,820	m <sup>2</sup>
Acabamentos Internos	Argamassa pré-fabricada	531,366	700,620	ton
	Argamassa colante	<b>Não consta</b>	550,680	ton
	Argamassa refratária	<b>Não consta</b>	1.500,000	kg
	Contrapiso	97,778	82,000	ton
	Piso Porcelanato	12.154,640	17.058,940	m <sup>2</sup>
	Piso Cerâmico	918,000	<b>Não consta</b>	m <sup>2</sup>
	Piso Vinílico	30,800	<b>Não consta</b>	m <sup>2</sup>
	Rejunte	3.259,270	2.100,000	kg
	Granito	31.044,155	24.982,540	kg
	Pintura piso: látex-acrílica	<b>Não consta</b>	7.190,000	m <sup>2</sup>
	Granito	<b>Não consta</b>	9.800,430	kg
	Porcelanato	6.491,840	4.449,420	m <sup>2</sup>
	Revestimento cerâmico	86,010	648,640	m <sup>2</sup>
	Massa PVA	19.498,640	44.060,000	kg
Parede	Pintura parede: tinta acrílica	17.548,780	34.344,000	m <sup>2</sup>
	Esmalte	397,600	997,740	kg
	Revestimento Pedra Esculpida	<b>Não consta</b>	943,000	kg
	Revestimento à base de resina com resíduos de granito e mármore	<b>Não consta</b>	4.080,000	kg
	Gesso em saco	<b>Não consta</b>	15.080,000	kg
Teto	Chapa de gesso acartonado	29.333,430	21.355,200	m <sup>2</sup>
	Massa PVA para drywall	6.668,310	5.055,000	kg
	Pintura teto: tinta acrílica	13.336,620	19.224,000	m <sup>2</sup>

	<b>Bancadas</b>	Granito	<b>Não consta</b>	85716,580	kg
--	-----------------	---------	-------------------	-----------	----

Fonte: Dados concedidos pela construtora e coletados no canteiro de obras (2023).

Uma grande variação observada nos quantitativos levantados foi no concreto utilizado na fundação. No orçamento, o quantitativo previsto foi de 538,750 kg, enquanto os dados reais indicaram um aumento de 54%. Além disso, no mesmo elemento fundação, o quantitativo de brita também apresentou uma variação notável, com uma diferença de aproximadamente 18% entre os dados de projeto e os dados reais de obra. Conforme detalhado no capítulo 3, o solo local é do tipo duríssimo, conferindo elevada resistência à escavação, sendo necessário o uso de picões, rompedores e marteletes pneumáticos para a remoção das camadas mais resistentes, abrindo valas maiores, o que automaticamente aumentou o consumo de concreto.

No elemento estrutura as variações foram menores para o quantitativo do concreto, cerca de 10,49% a mais no orçamento em relação ao consumido de fato. O quantitativo para o aço, brita e madeira aplinada não sofreu grandes variações nesse elemento.

Na envoltória os materiais que apresentaram maior variação no quantitativo levantado foram o vidro de 8 mm, com aproximadamente 121,67% a mais de material no quantitativo real, o granito aumentou em 131,07% nos dados obtidos *in loco* e o bloco de concreto teve um consumo de 40,27% maior do que o do orçamento. O revestimento cerâmico foi orçado bem acima da quantidade utilizada, o que se deve pela substituição de grande parte das vedações pelo uso do bloco de concreto, no lugar do tijolo cerâmico. O vidro de 10 mm existente no orçamento não foi utilizado na obra.

Nas partições internas é possível observar que alguns materiais que não foram orçados, ou foram denominados com nomes diferentes, foram utilizados na obra como o bloco de concreto, o chapisco e o cimento. Os blocos cerâmicos tiveram uma previsão orçamentária cerca de 81,96% maior que os dados reais.

O elemento acabamentos internos teve diversos materiais que não foram previstos no orçamento, como a argamassa colante, argamassa refratária, pintura látex-acrílica para piso, granito aplicado nas paredes, revestimento pedra esculpida, revestimento em massa, à base de resina com resíduos de granitos e mármores, gesso em saco e o granito atualizado nas bancadas. Entretanto, o piso cerâmico e o piso vinílico não foram identificados nas notas fiscais coletadas na obra. Destaca-se que o quantitativo da massa PVA aplicada nas paredes foi cerca de 126% maior para dados reais, a tinta acrílica para pintura das paredes sendo 95,5% maior com dados

coletados em obra e o quantitativo da argamassa pré-fabricada que foi 31,85% maior com dados de reais.

Essas discrepâncias expressivas nos quantitativos de materiais, ou até mesmo ausência no quantitativo, evidenciam um desafio significativo na estimativa das emissões de carbono embutidas quando se baseiam exclusivamente em dados de projeto e orçamentário. A diferença entre os valores projetados e os efetivamente utilizados na obra indica que, ao considerar apenas os quantitativos previstos, pode-se gerar uma sub ou superestimação das emissões associadas à edificação. Essa imprecisão tem relação direta com a confiabilidade das análises ambientais.

Assim, torna-se essencial o uso de dados reais para avaliações mais precisas, garantindo que a modelagem das emissões reflita a realidade do setor da construção civil. A colaboração entre projetistas, construtores e pesquisadores é fundamental, promovendo uma cultura mais assertiva e o aprimoramento contínuo na gestão da sustentabilidade.

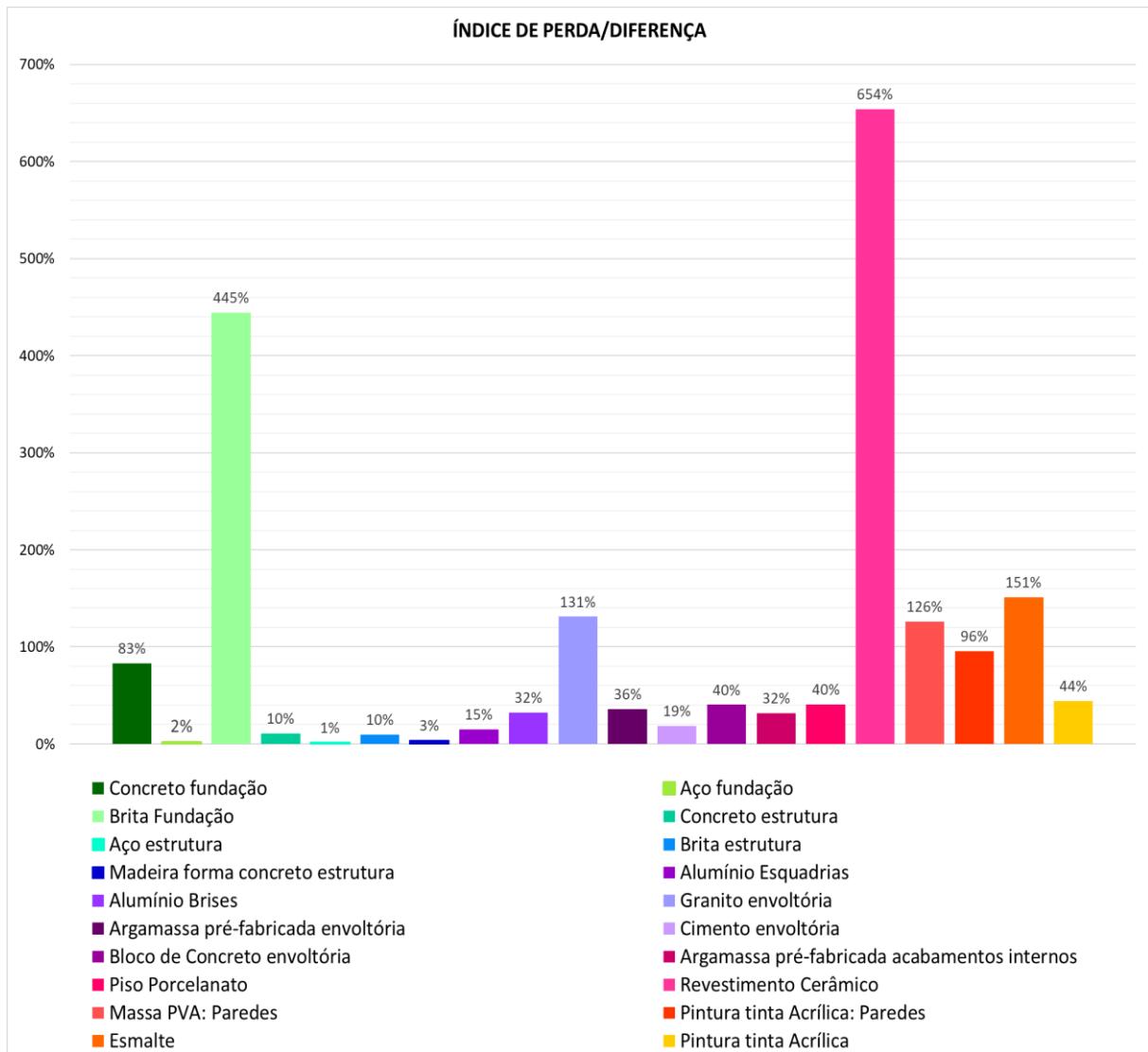
#### **4.1.1 Contribuição dos materiais para as emissões embutidas associadas às perdas totais**

Com o levantamento do quantitativo dos materiais também foi possível gerar um índice de perda/diferença para alguns materiais bem como as emissões referentes a essas perdas, considerando as condições da edificação aqui avaliada.

A **Figura 28** apresenta o índice de perda ou diferença percentual de diversos materiais utilizados na edificação, calculado apartir dos quantitativos levantados, oferecendo uma visão detalhada sobre a variação entre o previsto e o utilizado.

Nota-se que alguns materiais apresentam índices significativamente elevados, como a brita empregada na fundação e o revestimento cerâmico, cujas diferenças ultrapassam 400% e 600%, respectivamente. Essas variações, no caso do edifício avaliado, estão associadas a fatores como a complexidade do solo encontrado para a execução da obra e a substituição do revestimento, possivelmente para atender a demandas da norma de desempenho, observada nas simulações computacionais preliminares.

Outros insumos, como concreto, granito, massa PVA para as paredes, tinta acrílica e esmalte exibem diferenças mais moderadas, mas que ainda merecem atenção. Esses aspectos reforçam a importância de estratégias que aprimorem o controle e a eficiência no uso dos materiais ao longo da construção.

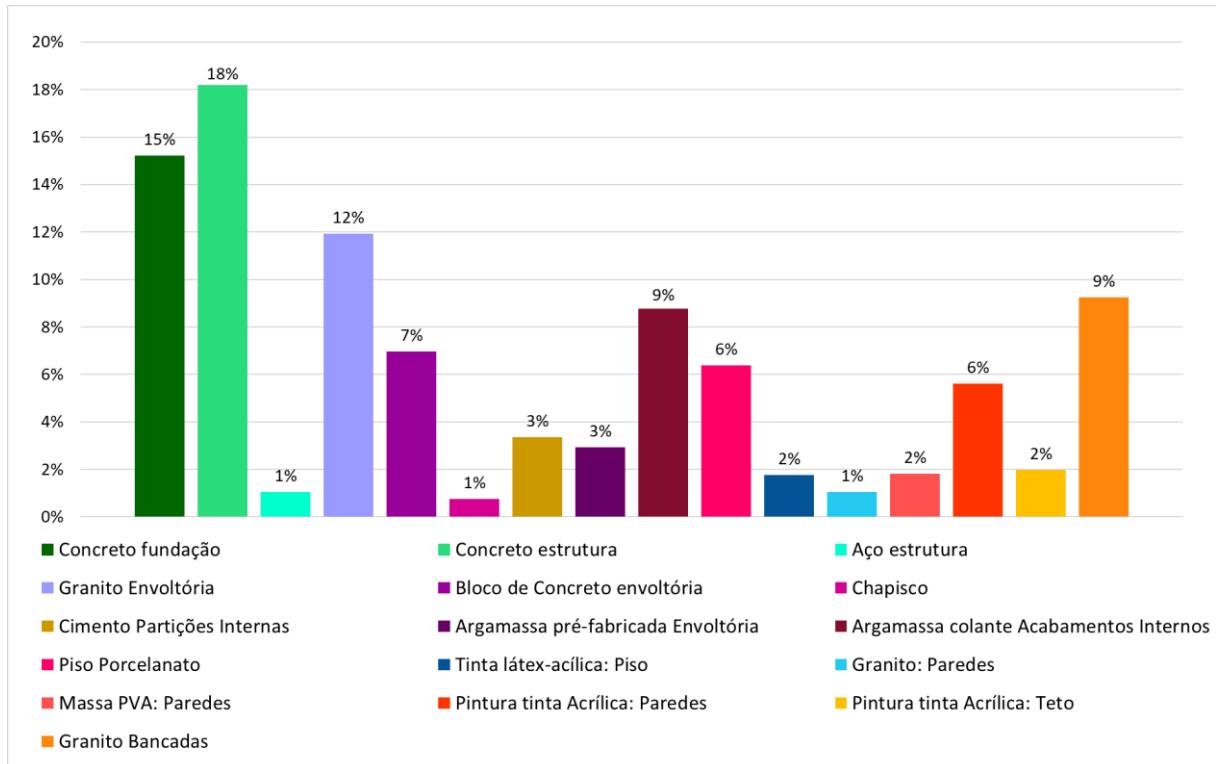
**Figura 28** - Índice de perda/diferença por material entre o previsto e o utilizado.

A análise desses dados é essencial para compreender os desafios na construção, considerando que cada obra é única. As condições locais, as decisões construtivas, o tempo de execução dos serviços, dentre outras questões impactam diretamente da gestão da obra. O setor é extremamente complexo e o levantamento de dados como os aqui apresentados são muito importantes.

Já em relação as emissões provenientes dessas perdas/diferenças, a **Figura 29** apresenta a contribuição relativa de cada material para a emissão total de carbono associada às perdas no canteiro de obras, considerando a massa desperdiçada e o fator de emissão correspondente, expresso em kg CO<sub>2</sub>eq. Observa-se que os materiais com maior participação percentual nas emissões de perdas são o concreto da estrutura (18%), o concreto da fundação (15%) e o granito utilizado na envoltória (12%). Em seguida, destacam-se o bloco de concreto

(7%), a argamassa colante (9%), o granito das bancadas (9%) e o piso porcelanato (6%). Ainda que outros materiais apresentem percentuais inferiores, sua contribuição não é desprezível no contexto das emissões totais, a depender de sua intensidade de carbono e quantidade empregada.

**Figura 29 - Contribuição de cada material na emissão total das perdas**



A análise comparativa da **Figura 29** com os dados da **Figura 28**, que apresenta o índice de perda de materiais com base na diferença percentual entre os quantitativos previstos em projeto e os efetivamente executados em obra, revela importantes contrastes entre o volume perdido e o impacto ambiental associado as suas emissões. Por exemplo, embora o concreto da estrutura tenha apresentado a maior contribuição para as emissões de perdas (18%), seu índice de perda foi baixo (10%), indicando que seu impacto elevado se deve à sua alta intensidade de carbono por unidade de massa e à grande quantidade utilizada. Em contrapartida, o concreto da fundação, que aparece com 15% das emissões, teve um índice de perda expressivo (83%), reforçando a necessidade de medidas de controle mais eficazes durante sua execução.

Outro caso crítico é o granito da envoltória, que aparece tanto entre os materiais com alta emissão de carbono associada às perdas (12%) quanto com um índice de perda elevado (96%), sinalizando uma oportunidade clara de redução de impacto por meio de melhorias na

especificação, transporte ou instalação. A pintura tinta acrílica para paredes também chama atenção: embora represente 6% das emissões de perdas, apresenta um índice de perda extremamente elevado (654%), o que evidencia uma ineficiência significativa na etapa de acabamento. Situação semelhante ocorre com a massa PVA (2% das emissões e 126% de perda) e o piso porcelanato (6% das emissões e 40% de perda), apontando para a necessidade de maior atenção à execução e ao planejamento logístico desses materiais.

Conclui-se que a simples análise dos índices de perda em termos quantitativos não é suficiente para identificar os principais pontos críticos sob a ótica ambiental das emissões de carbono. Materiais como o concreto estrutural, mesmo com perdas físicas mínimas, possuem elevada representatividade nas emissões devido à sua intensidade de carbono e volume utilizado. Por outro lado, materiais como tintas e massas, embora com menores impactos unitários, apresentam perdas operacionais tão elevadas que passam a representar parcela significativa das emissões associadas ao desperdício. Assim, a integração entre dados quantitativos de obra e os resultados da ACV permite uma leitura mais precisa e estratégica para a tomada de decisão em projetos e canteiros, apoiando a seleção de materiais e o aperfeiçoamento dos processos construtivos em direção à redução efetiva das emissões de gases de efeito estufa no setor da construção civil.

#### 4.1.2 Emissões embutidas de GEEs: Estágios A1-A3

Nesta seção, são apresentados e analisados os resultados relativos às emissões de GEEs associadas aos estágios do ciclo de vida A1 a A3. Esses estágios incluem, respectivamente, a extração das matérias-primas, o transporte dessas matérias até as indústrias de transformação e, por fim, os processos de fabricação dos materiais empregados na construção da edificação. Trata-se, portanto, de uma avaliação das emissões embutidas nos materiais antes mesmo de sua chegada ao canteiro de obras.

A **Tabela 10** sintetiza esses resultados, apresentando tanto as emissões individuais referentes a cada tipo de material inventariado quanto as emissões embutidas totais correspondentes a cada um dos elementos construtivos considerados no estudo. Esses resultados possibilitam uma compreensão mais detalhada da contribuição de cada material e componente para o impacto ambiental global da edificação, fornecendo subsídios importantes para estratégias de redução de emissões na fase de projeto e especificação de materiais.

Tabela 10 - Emissões embutidas de GEEs dos estágios A1-A3.

		Estágio A1-A3		
	Material	Dados de Projeto	Dados de obra	U.M
Fundação	Concreto fck 40 MPa	164.318,75	300.272,50	kgCO <sub>2</sub> -eq
	Aço CA-50	60.928,20	61.851,60	kgCO <sub>2</sub> -eq
	Brita	611,77	3.331,18	kgCO <sub>2</sub> -eq
	<b>PAG total</b>	<b>225.858,72</b>	<b>365.455,28</b>	<b>kgCO<sub>2</sub>-eq</b>
Estrutura	Concreto fck 40 MPa	1.548.796,10	1.711.355,00	kgCO <sub>2</sub> -eq
	Aço CA-50	797.688,00	807.084,00	kgCO <sub>2</sub> -eq
	Brita	42.622,51	46.705,79	kgCO <sub>2</sub> -eq
	Madeira aplainada plastificada para forma de concreto	1.075,46	1.112,78	kgCO <sub>2</sub> -eq
	<b>PAG total</b>	<b>2.389.106,61</b>	<b>2.566.257,56</b>	<b>kgCO<sub>2</sub>-eq</b>
Envoltória	Vidro 8 mm	121.829,58	54.960,31	kg CO <sub>2</sub> -eq
	Vidro 10 mm	3.656,00	<b>Não consta</b>	kgCO <sub>2</sub> -eq
	Alumínio Esquadrias	91.189,81	104.965,81	kgCO <sub>2</sub> -eq
	Alumínio Brises	15.071,90	19.944,20	kgCO <sub>2</sub> -eq
	Alumínio requadros	3.595,01	1.596,60	kgCO <sub>2</sub> -eq
	Granito	81.329,20	187.917,32	kgCO <sub>2</sub> -eq
	Argamassa pré-fabricada	9.056,03	12.284,06	kgCO <sub>2</sub> -eq
	Cimento	9.072,00	10.770,43	kgCO <sub>2</sub> -eq
	Revestimento Cerâmico	943,60	142,82	kgCO <sub>2</sub> -eq
	Bloco de Concreto	3.266,92	4.585,80	kgCO <sub>2</sub> -eq
	<b>PAG total</b>	<b>339.010,05</b>	<b>397.164,34</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>-eq</b>
Partições Internas	Bloco de Concreto	<b>Não consta</b>	62.161,55	kgCO <sub>2</sub> -eq
	Bloco Cerâmico	216.456,56	118.987,21	kgCO <sub>2</sub> -eq
	Chapisco	<b>Não consta</b>	6.826,65	kgCO <sub>2</sub> -eq
	Cimento	<b>Não consta</b>	30.005,76	kgCO <sub>2</sub> -eq
	Portas prontas	745,04	749,01	kgCO <sub>2</sub> -eq
	<b>PAG total</b>	<b>217.201,60</b>	<b>218.730,18</b>	<b>kgCO<sub>2</sub>-eq</b>
Acabamentos Internos	Geral	Argamassa pré-fabricada	82.361,73	108.596,10
		Argamassa colante	<b>Não consta</b>	78.196,56
		Argamassa refratária	<b>Não consta</b>	660,00
	Piso	Contrapiso	18.284,49	15.334,00
		Piso Porcelanato	140.993,82	197.883,70
		Piso Cerâmico	3.093,66	<b>Não consta</b>
		Piso Vinílico	182,64	<b>Não consta</b>
		Rejunte	2.066,38	1.331,40
		Granito	29.895,52	24.058,19
		Pintura piso: látex-acrílica	<b>Não consta</b>	15.746,10
	Parede	Granito	<b>Não consta</b>	9.437,81
		Porcelanato	75.305,34	51.613,27
		Revestimento cerâmico	289,85	2.185,92
		Massa PVA	12.908,10	29.167,72
		Pintura paredes: tinta acrílica	52.295,36	102.345,12
		Esmalte	1.196,78	3.003,20
		Revestimento Pedra Esculpida	<b>Não consta</b>	908,11

	Revestimento em massa, à base de resina com resíduos de granitos e mármore	<b>Não consta</b>	3.929,04	kgCO <sub>2</sub> -eq
<b>Teto</b>	Gesso em saco	<b>Não consta</b>	3.558,88	kgCO <sub>2</sub> -eq
	Chapa de gesso acartonado	48.986,83	35.663,18	kgCO <sub>2</sub> -eq
	Massa PVA para drywall	2.600,64	1.971,45	kgCO <sub>2</sub> -eq
	Pintura teto: tinta acrílica	39.743,13	57.287,52	kgCO <sub>2</sub> -eq
<b>Bancadas</b>	Granito	<b>Não consta</b>	82.545,07	kgCO <sub>2</sub> -eq
<b>PAG total</b>		<b>510.204,28</b>	<b>825.422,34</b>	<b>kgCO<sub>2</sub>-eq</b>
<b>PAG TOTAL Estágios A1-A3</b>		<b>3.681.381,25</b>	<b>4.373.029,69</b>	<b>kgCO<sub>2</sub>-eq</b>

A **Figura 30** apresenta o comparativo das emissões para cada elemento, considerando os estágios A1 a A3, para cada fonte de dados, sendo A) fundação, B) estrutura, C) envoltória, D) partições internas e E) acabamentos internos.

No elemento fundação, **figura 30 (A)**, observa-se que o concreto possui a maior contribuição para as emissões embutidas em ambos os cenários, correspondente a 72,8% para os dados de projeto (164.318,75 kg CO<sub>2</sub>-eq) e 82,2% para os dados reais, correspondente a 300.272,50 kg CO<sub>2</sub>-eq. O aumento do consumo de concreto neste item está relacionado ao tipo de solo, classificado como solo duríssimo.

As características do terreno influenciaram significativamente a execução da fundação onde o solo duríssimo, com grande resistência à escavação, demandou a necessidade de utilizar rompedores e marteletes pneumáticos nas camadas mais resistentes, o que abriu valas que necessitaram de maior volume de concreto para serem fechadas. Ademais, um bloco com grande consumo de concreto foi executado no subsolo para acomodar o reservatório inferior do edifício, contribuindo também para esse aumento.

O aço teve redução no consumo, passando de um total de 27% do total do item no previsto para 16,9% no utilizado. A brita, embora tenha uma participação muito menor no total do item, teve um aumento de 0,3% para 0,9% no total do item.

Figura 30 - Emissões embutidas de GEEs por elemento da edificação para dados de projeto e de obra, para os estágios A1-A3.



Analisando o PAG total do elemento fundação, observa-se um aumento significativo dos valores previstos para os utilizados, aumentando em 62% nas emissões quando se utilizam os dados reais, passando de 225.858,72 kg CO<sub>2</sub>-eq para 365.455,28 kg CO<sub>2</sub>-eq. Esse crescimento reflete o maior consumo de materiais na execução da fundação em relação ao previsto no projeto, evidenciando a importância de considerar dados reais para uma avaliação mais precisa do impacto ambiental da construção, principalmente na edificação avaliada.

A interpretação das emissões embutidas de GEEs associadas aos materiais do elemento estrutura da edificação, **Figura 30 (B)**, revela que o concreto foi o principal responsável pelas emissões em ambos os cenários, bem como já observado no elemento fundação. Nos dados previstos, o concreto representou 64,83% das emissões totais, o equivalente a 1.548.796,10 kg CO<sub>2</sub>-eq, enquanto nos dados utilizados essa participação aumentou para 66,72%, alcançando uma emissão de 1.711.355,00 kg CO<sub>2</sub>-eq.

Em contrapartida, o aço, cujas emissões variaram de 797.688,00 a 807.084,00 kg CO<sub>2</sub>-eq, apresentou uma leve redução em sua participação relativa, passando de 33,39% nas estimativas de projeto para 31,46% nos dados reais de obra. Já a brita, com uma variação menor de 42.622,51 a 46.705,79 kg CO<sub>2</sub>-eq, e a madeira, de 1.075,46 a 1.112,78 kg CO<sub>2</sub>-eq, mantiveram participações marginais nas emissões totais, variando entre 1,78% e 1,82% para a brita, é de 0,05% para 0,04% no caso da madeira, sem impactos significativos no cenário global das emissões.

Esse aumento da participação nas emissões do concreto está diretamente relacionado ao maior volume utilizado do material, um fator que só pode ser devidamente identificado por meio da coleta de dados reais no canteiro de obras. Isso evidencia a importância dessas informações para uma avaliação precisa das emissões no setor da construção, permitindo assim uma visão mais fidedigna da realidade.

O maior consumo de concreto pode estar vinculado, entre outros fatores, ao tipo de laje adotado no projeto. Na edificação avaliada foi utilizado o concreto protendido, que embora permita menores espessuras, utiliza vigas robustas. O consumo de concreto está relacionado com as especificidades do projeto, como cargas aplicadas, vãos e requisitos arquitetônicos.

Fazendo um comparativo do PAG total dos estágios A1 ao A3 obtido para cada cenário de dados no elemento estrutura, houve um aumento de 7,37% no PAG total para o real utilizado, alcançando 2.566.257,56 kg CO<sub>2</sub>-eq. Essa variação nos resultados do elemento estrutura, inferior a 10%, sugere que o orçamento prévio do projeto foi consideravelmente assertivo.

A análise das emissões embutidas de GEEs nos estágios A1-A3 do elemento envoltória, **Figura 30 (C)**, mostra discrepâncias significativas entre os valores estimados no projeto e os dados reais obtidos na obra. Essas diferenças indicam alterações nos materiais utilizados, possíveis substituições e variações nos processos construtivos, impactando diretamente o PAG associado a esse elemento da edificação.

No elemento envoltória, o granito foi o material com maior contribuição para as emissões nos dados de obra, conforme ilustrado na **Figura 30 (C)**, representando 47,31% do total. Em seguida, destaca-se o alumínio utilizado nas esquadrias, responsável por 26,43% das emissões. Nos dados de projeto, no entanto, o granito ocupou a terceira posição, com 23,99% das emissões totais, evidenciando a maior variação percentual entre os materiais analisados nesse elemento — um acréscimo de aproximadamente 131% nas emissões quando comparado aos dados de obra. O alumínio das esquadrias, por sua vez, manteve-se como o segundo maior emissor tanto nos dados de projeto quanto nos de obra, com valores de 91.189,81 kg CO<sub>2</sub>-eq e 104.965,81 kg CO<sub>2</sub>-eq, respectivamente, o que corresponde a uma variação de cerca de 15%.

Nos dados de projeto do elemento envoltória, o vidro de 8 mm destacou-se como o material com maior emissão de carbono, sendo responsável por 35,93% do total, o equivalente a 121.829,58 kg CO<sub>2</sub>-eq. No entanto, nos dados de obra, esse valor foi reduzido para 54.960,31 kg CO<sub>2</sub>-eq, representando uma diminuição de aproximadamente 54,89% e posicionando o material como o terceiro maior emissor em obra. Ressalta-se ainda que o vidro de 10 mm, previsto inicialmente no orçamento, não foi utilizado na execução da obra.

O quarto maior emissor para ambas as fontes de dados na envoltória foi o alumínio dos brises. Para dados de projeto o material totalizou 15.071,90 kg CO<sub>2</sub>-eq, o que corresponde a 4,45% das emissões da envoltória, e para dados de obra 19.944,20 kg CO<sub>2</sub>-eq, equivalente a 5,02% das emissões totais do elemento. Esse material também apresentou um elevado percentual de variação, sendo as emissões de obra 32,34% superiores as de projeto.

A argamassa pré-fabricada e o cimento também apresentaram variações significativas entre as emissões para cada fonte de dados. Entre projeto e obra a argamassa pré-fabricada sofreu uma variação de 35,65%, sendo as emissões de obra superiores. Já as emissões provenientes do cimento tiveram uma variação inferior, cerca de 18,72% a mais para dados de obra. O bloco de concreto também apresentou aumento em obra, equivalente a 40,28%.

O revestimento cerâmico apresentou a menor participação nas emissões da envoltória, cerca de 0,28% em projeto e 0,04% em obra. Apesar da baixa participação nas emissões,

destaca-se uma queda significativa, de 943,60 kg CO<sub>2</sub>-eq em projeto para 142,82 kg CO<sub>2</sub>-eq, em obra, representando uma redução de 84,87%. Outra redução significativa foi do alumínio empregado nos requadros, cerca de 55,61% a menos nas emissões de obra quando comparadas as de projeto.

Essas variações indicam ajustes significativos na composição da envoltória durante a execução da obra, refletindo a redução do uso de materiais como vidro e revestimento cerâmico, enquanto o consumo de granito, argamassa pré-fabricada e alumínio dos brises, aumentou significativamente. Em termos globais, o PAG da envoltória apresentou uma variação de 17,15%, onde o PAG da envoltória passou de 339.010,05 kg CO<sub>2</sub>-eq (dados de projeto) para 397.164,34 kg CO<sub>2</sub>-eq (dados de obra). Esse aumento foi impulsionado principalmente pelo maior uso de granito, um material com alto fator de carbono.

A avaliação das emissões de GEEs nos estágios A1-A3 das partições internas também mostram diferenças entre os valores projetados e os de obra. Bem como destaca a **Figura 30 (D)**, o bloco cerâmico apresenta a maior emissão de CO<sub>2</sub> equivalente nos dados de projeto, com um valor de 216.456,56 kg CO<sub>2</sub>-eq, correspondendo a 99,66% das emissões totais projetadas para esse elemento.

Nos dados de obra, as emissões associadas ao bloco cerâmico foram reduzidas para 118.987,21 kg CO<sub>2</sub>-eq, mas seguiu representando ainda 54,40% do total. Mesmo com a inclusão de outros materiais na contabilização das emissões, os dados coletados no canteiro de obra confirmam que o bloco cerâmico continua sendo o maior emissor entre os materiais analisados. Isso se deve ao fato de ser um material altamente intensivo em carbono, assim como o granito e o concreto, e apresentar um fator de emissão elevado (0,235 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg).

O bloco de concreto não foi considerado no orçamento, entretanto, nos dados de obra, sua contribuição é significativa, com emissões de 62.161,55 kg CO<sub>2</sub>-eq, correspondendo a 28,42% das emissões totais do elemento, sendo assim o segundo maior emissor nesse elemento da edificação.

O chapisco apresenta emissões de 6.826,65 kg CO<sub>2</sub>-eq na obra, o que corresponde a 3,12% das emissões totais do elemento e o cimento equivalente a 13,72% do total. Por fim, as portas apresentam valores semelhantes entre os dois cenários, com 745,04 kg CO<sub>2</sub>-eq no projeto e 749,01 kg CO<sub>2</sub>-eq na obra. Sua participação percentual nas emissões totais do elemento é pequena, sendo de 0,34% em obra.

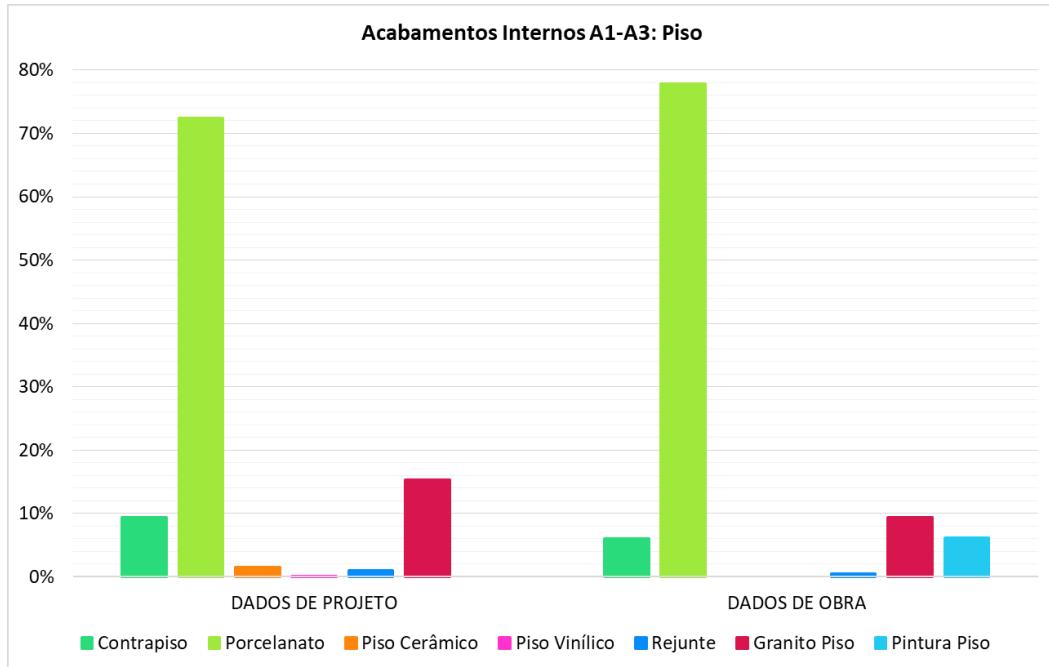
Comparando os cinco grupos de materiais, **Figura 30 (E)**, observa-se que o piso apresentou as maiores emissões embutidas tanto no projeto quanto na obra, apesar da redução proporcional de 38,13% para 30,81%. Em seguida, os materiais de parede, que também tiveram queda na participação (de 27,83% para 24,54%), continuaram representando uma parcela significativa das emissões. O grupo geral, por outro lado, teve um aumento expressivo na obra, passando de 16,14% para 22,71%, tornando-se o terceiro maior contribuinte. O teto apresentou a maior redução proporcional, caindo de 17,90% para 11,93%, enquanto as bancadas, que não estavam previstas no projeto, emergiram na obra com 10% das emissões, valor expressivo.

A análise geral de materiais evidencia um aumento significativo das emissões embutidas na obra devido à inclusão de materiais não contabilizados no orçamento do projeto. As emissões totais desse grupo saíram de 82.361,73 kg CO<sub>2</sub>-eq, para 187.452,66 kg CO<sub>2</sub>-eq, o que representa um aumento de aproximadamente 127%.

A argamassa pré-fabricada reduziu sua participação percentual de 100%, com dados de projeto, para 57,93% com dados reais. A principal diferença está na argamassa colante, ausente no projeto, mas que representou 41,72% das emissões do grupo, enquanto a argamassa refratária, também não prevista, teve impacto marginal de 0,35%.

O grupo piso, responsável por 194.516,51 kg CO<sub>2</sub>-eq com dados de projeto e 254.353,39 kg CO<sub>2</sub>-eq com dados de obra, teve para ambos os cenários o porcelanato como maior emissor. Esse material foi responsável por 72,48% e 77,80% das emissões do grupo respectivamente, destacando um aumento de 5,32% quando quantificado com dados de obra devido ao maior uso do material no canteiro, como apresentado na **Figura 31**.

Figura 31 - Percentual de participação nas emissões do grupo piso por material.



Em sequência, o granito aparece como o segundo maior emissor para ambas as fontes de dados, porém com um maior percentual para dados de projeto cujo valor foi de 15,37%, caindo para 9,46% com dados do canteiro de obras. O contrapiso saiu de 9,40% para 6,03% das emissões para dados reais.

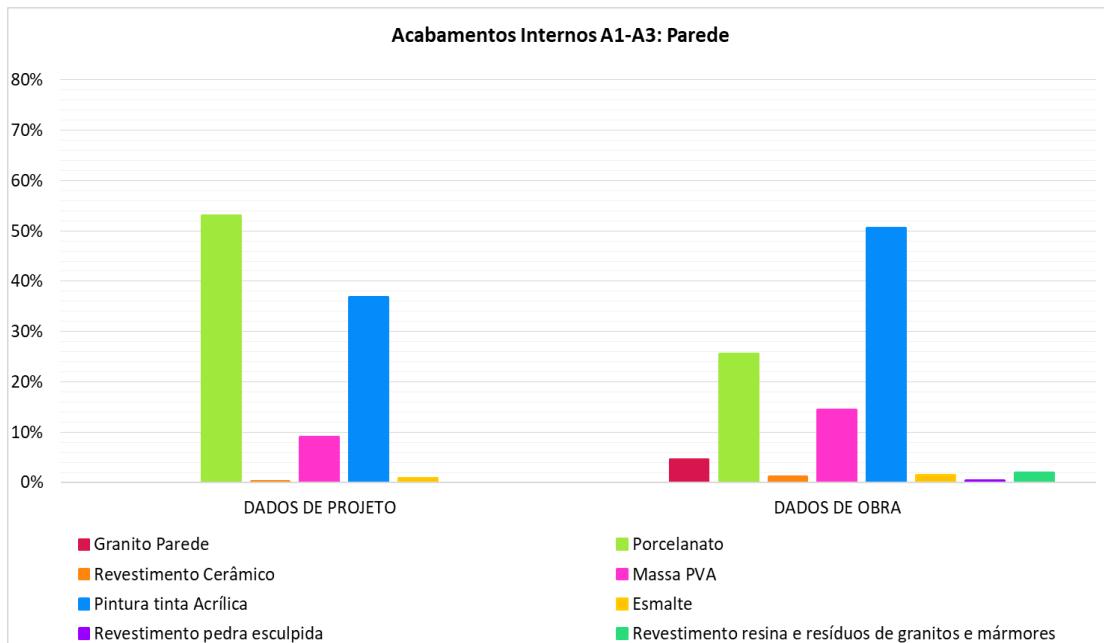
A pintura de piso, ausente no projeto inicial, representou 6,19% das emissões na obra, um valor significativo dentro do contexto geral. Já o piso cerâmico e o piso vinílico, inicialmente considerados no projeto, foram eliminados na execução. Essas variações indicam substituições de materiais entre a fase orçamentária e a executiva, relacionada com a qualidade almejada para o empreendimento.

O principal emissor no grupo parede para dados de projeto foi o porcelanato, responsável 53,03% das emissões. Em contrapartida, o porcelanato foi o segundo maior emissor quando analisados os dados reais de obra, abaixando o percentual de participação para 25,48%, 51.613,27 kg CO<sub>2</sub>-eq, uma redução de aproximadamente 31,46%.

Com os dados reais, o material com maior percentual de participação nas emissões do grupo parede foi a pintura em tinta acrílica com 50,52% do total das emissões. Esse mesmo material ocupa a segunda colocação nas emissões com dados de projeto, abaixando esse percentual para 36,83% devido ao menor valor estimado desse material no orçamento prévio de projeto. A massa pva possui o terceiro maior percentual de emissão em ambos os cenários,

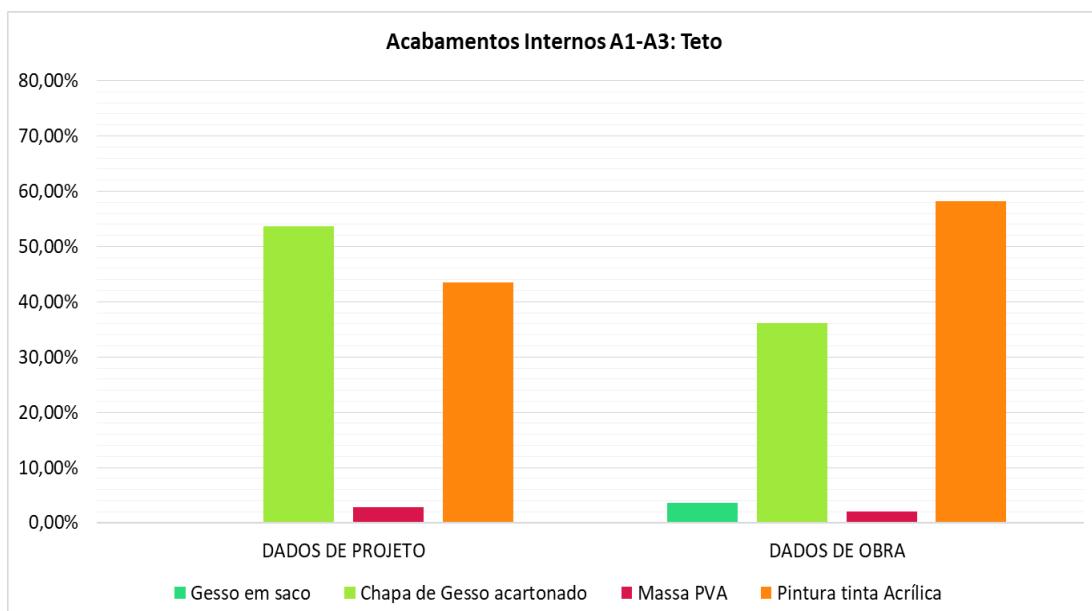
projeto e obra, contando com um aumento expressivo de 12.908,10 kg CO<sub>2</sub>-eq para 29.167,72 kg CO<sub>2</sub>-eq respectivamente, saindo de 9,09% para 14,40%, conforme **Figura 32**.

Figura 32 - Percentual de participação nas emissões do grupo parede por material.



A chapa de gesso acartonado, inicialmente prevista como o material mais representativo sendo responsável por 53,03%, cerca de 48.986,83 kg CO<sub>2</sub>-eq, teve sua participação reduzida para 35% na obra real, alcançando 35.663,18 kg CO<sub>2</sub>-eq. Em contrapartida, enquanto a pintura com tinta acrílica aumentou de 45% para 60%, tornando-se a maior fonte de emissões no cenário de obra (**Figura 33**).

Figura 33 - Percentual de participação nas emissões do grupo teto por material.



O gesso em saco representa cerca de 5% das emissões na execução. A massa PVA manteve participação baixa e estável em ambos os cenários, variando de 2,85% para 2,00%.

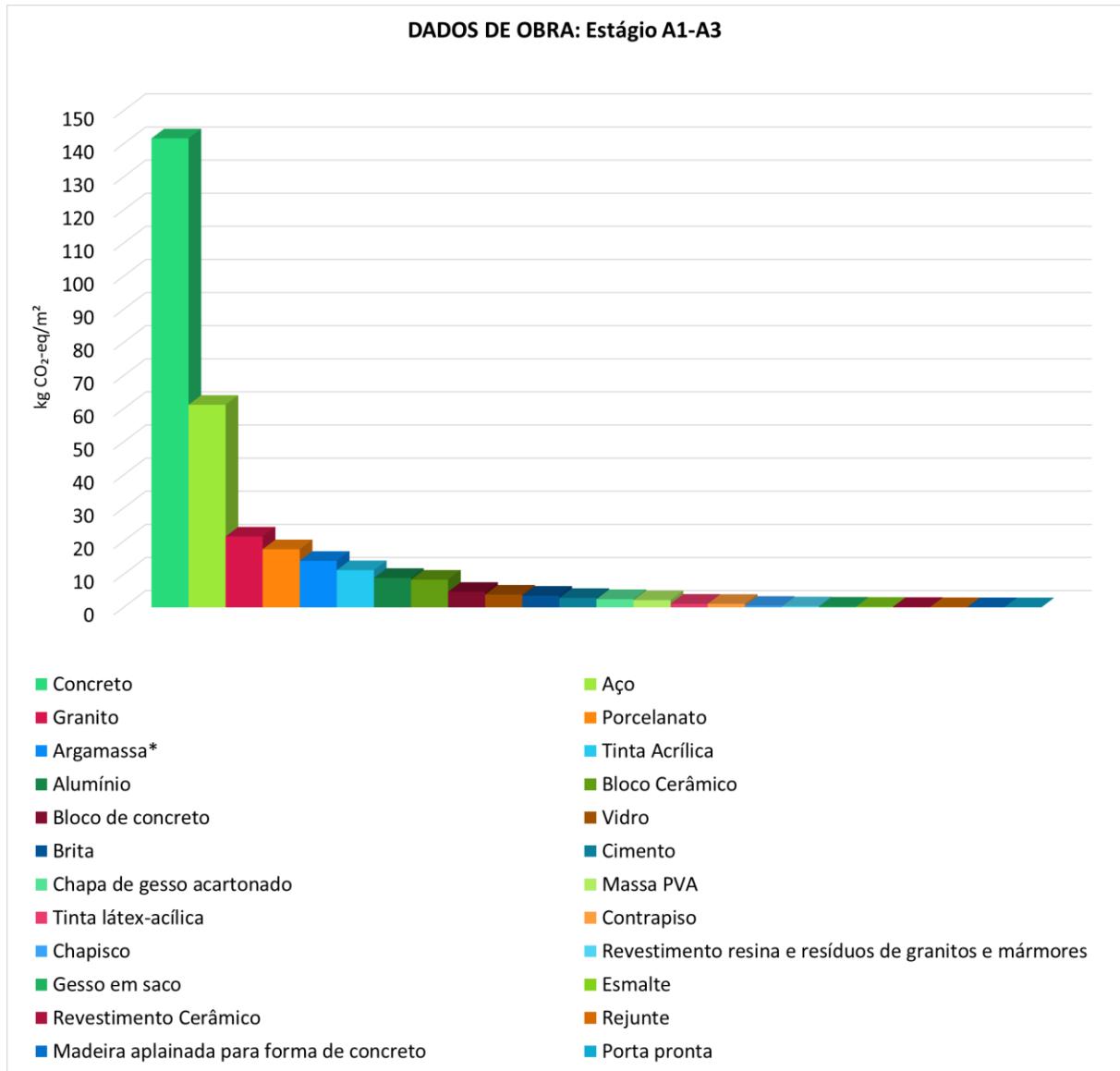
Ao realizar uma análise da emissão total de cada material, somando as emissões do mesmo material para cada elemento, e comparando com a área total da edificação, é possível observar os materiais mais emissores no contexto global da edificação para dados de obra. Conforme a **Figura 34** apresenta, o concreto foi o material mais emissivo, atingindo 141,63 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, cerca de 47,37% das emissões totais. O aço aparece em segundo lugar com um valor relativamente inferior ao do concreto, cerca de 61,18 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, 20,46% das emissões totais. O granito aparece como terceiro maior emissor com 21,40 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> e um percentual de 7,16% das emissões.

Karlsson *et al.* (2021) observaram que para reduzir as emissões do concreto poderia reduzir o teor de aglomerantes, melhorar a eficiência energética na fabricação, como por exemplo a substituição de combustíveis fósseis por biomassa, e reduzir a intensidade de ligantes otimizando a mistura. Outro fator importante seria a redução do teor de clínquer no cimento. A substituição por materiais cimentícios suplementares como cinzas volantes e escória de alto-forno poderia reduzir as emissões.

Já para o aço, Karlsson *et al.* (2021) enfatiza o poder da reciclagem. O aço reciclado apresenta uma emissão de carbono inferior em comparação ao aço produzido a partir de minério virgem. No Brasil, em 2023, o setor siderúrgico utilizou cerca de 24% de sucata ferrosa em sua produção (Cavalcanti, 2024), o que indica que ainda há espaço para ampliação dessa reciclagem, representando uma estratégia para mitigação das emissões desse material.

O porcelanato é 4º colocado dentre os maiores emissores, o grande volume consumido desde material juntamente com seu fator de carbono consideravelmente alto são os principais fatores que o levaram a essa colocação, com cerca de 17,57 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>. Em 5ª colocação aparece a argamassa, que corresponde a somatória da argamassa colante, pré-fabricada e refratária, mesma base de fabricação, representam 14,06 CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> e em 6ª posição a tinta acrílica empregada nas paredes e teto com 11,24 CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>.

Figura 34 - Emissões por material construtivo por m<sup>2</sup> para dados de obra nos estágios A1-A3.



O alumínio, embora apresente uma pegada de carbono significativamente menor no Brasil em comparação a outros países, destacou-se como o oitavo maior emissor neste estudo, figurando entre os dez materiais com maior impacto. De acordo com a Associação Brasileira do Alumínio (2010), as emissões relacionadas à produção de alumínio primário no Brasil são, em média, 63% inferiores às verificadas no restante do mundo. Enquanto o fator de emissão global para o alumínio gira em torno de 7.100,00 kgCO<sub>2</sub>-eq/ton, o fator nacional é de apenas 2.661,00 kgCO<sub>2</sub>-eq/ton.

Apesar desse fator de emissão relativamente baixo, o grande volume de alumínio efetivamente utilizado na fachada da edificação — que apresenta um PAF elevado, em torno de 63% — resultou em uma contribuição significativa para o total de emissões. Nos dados de

obra, o alumínio atingiu 8,91 kgCO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, evidenciando como a quantidade de material pode compensar uma intensidade de carbono mais baixa por unidade de massa.

Dentre os materiais que apresentaram menores valores de emissões por m<sup>2</sup> estão o chapisco, gesso em saco, revestimento cerâmico, e ainda o rejunte e a madeira aplinada para forma de concreto, que possuem baixas quantidades, representando menos de 1 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>.

O setor de fabricação desempenha um papel essencial ao investir em processos produtivos de menor impacto, como a substituição de combustíveis fósseis, o aumento da reciclagem e o desenvolvimento de materiais alternativos. Paralelamente, arquitetos e engenheiros podem otimizar projetos estruturais para reduzir o uso de aço e do concreto, além de considerar materiais de menor pegada ambiental. Dessa forma, a escolha consciente de materiais e o aprimoramento dos processos produtivos ao longo de toda a cadeia de valor são essenciais para tornar a construção civil mais eficiente e alinhada com os desafios em alcançar edificações de baixo carbono que contribuam para a mitigação das mudanças climáticas.

#### 4.1.3 Emissões embutidas de GEEs: Estágios A4 e A5

As emissões do estágio A4 da edificação foram quantificadas para os 5 elementos. Diferente dos estágios A1-A3, no estágio de transporte, nas partições internas as emissões provenientes do transporte das portas prontas não foram quantificadas, e no elemento acabamentos internos, materiais com mais de uma destinação, como o alumínio que aparece nas esquadrias, brises e quadros, tinta acrílica utilizada na pintura das paredes e do teto, e os revestimentos cerâmicos e porcelanatos de piso e paredes, foram considerados um só, pois foram transportados e entregues juntos. A **Tabela 11** apresenta as emissões embutidas de GEEs do estágio A4 por elemento e material.

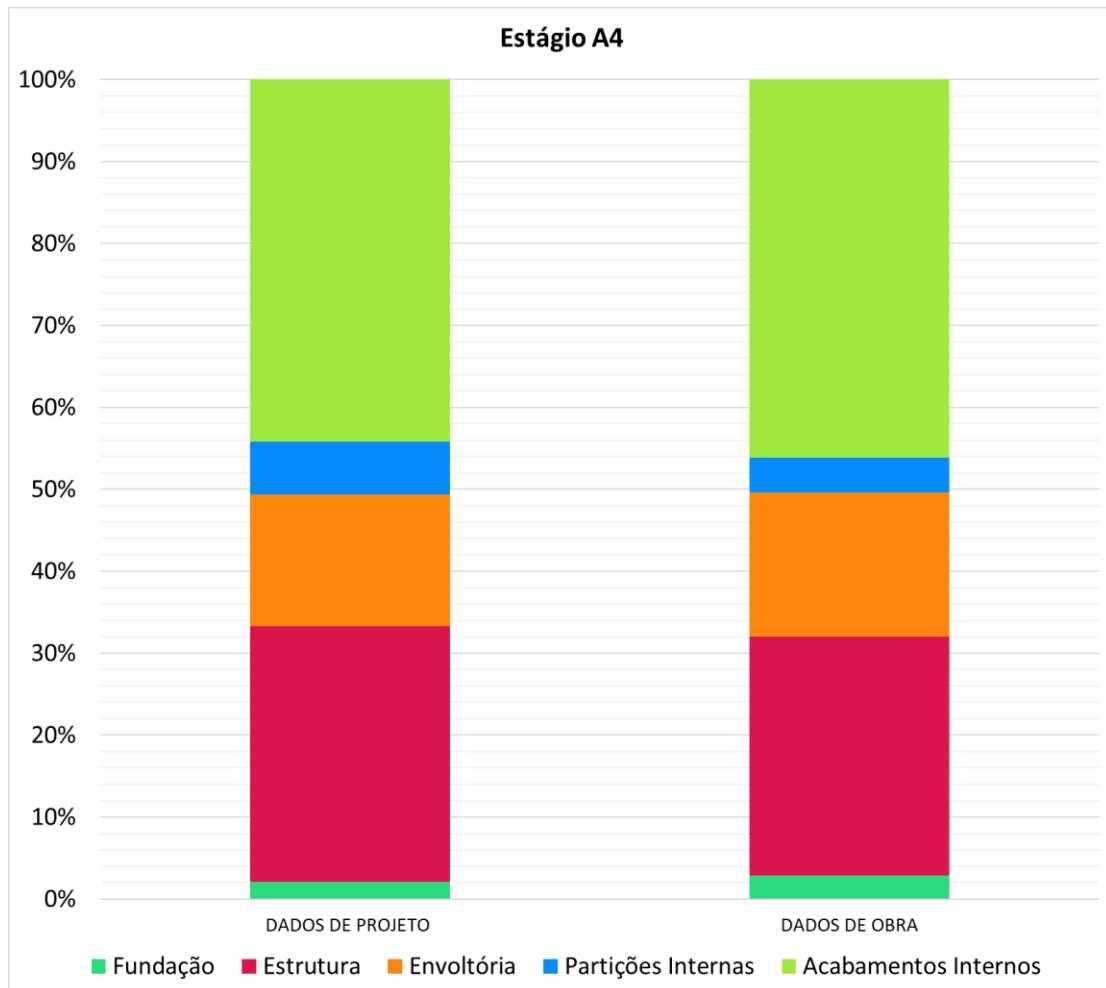
A análise das emissões incorporadas no estágio A4 evidencia discrepâncias entre os valores previstos e utilizados. No total, as emissões projetadas foram de 1.095.739,68 kg CO<sub>2</sub>-eq, enquanto os valores reais atingiram 1.222.381,39 kg CO<sub>2</sub>-eq, um acréscimo de 126.641,71 kg CO<sub>2</sub>-eq, representando um aumento de 11,56%.

Tabela 11 - Emissões embutidas de GEEs do estágio A4.

Estágio A4			
	Material	Dados de Projeto	Dados de obra
<b>Fundação</b>	Concreto Fck 40Mpa	7.731,62	14.128,60
	Aço CA-50	14.521,22	14.741,30
	Brita	1.189,63	6.477,72
	<b>PAG total</b>	<b>23.442,47</b>	<b>35.347,61</b>
<b>Estrutura</b>	Concreto Fck 40Mpa	72.874,87	80.762,33
	Aço CA-50	190.057,14	192.295,00
	Brita	78.296,62	83.129,74
	Madeira aplainada plastificada para forma de concreto	250,96	259,68
	<b>PAG total</b>	<b>341.479,59</b>	<b>356.446,74</b>
<b>Envoltória</b>	Vidro	47.550,36	20.827,16
	Alumínio	85.735,41	98.739,84
	Granito	40.161,84	92.806,57
	Argamassa pré-fabricada	659,40	894,44
	Cimento	266,60	316,55
	Revestimento Cerâmico	1.157,54	174,83
	Bloco de Concreto	604,31	847,80
	<b>PAG total</b>	<b>176.135,45</b>	<b>214.607,19</b>
<b>Partições Internas</b>	Bloco de Concreto	0,00	11.259,50
	Bloco Cerâmico	70.337,34	38.664,77
	Chapisco	0,00	1403,84
	Cimento	0,00	914,50
	Portas prontas	0,00	0,00
	<b>PAG total</b>	<b>70.337,34</b>	<b>52.242,60</b>
<b>Acabamentos Internos</b>	Argamassa pré-fabricada	5.997,00	7.907,17
	Argamassa colante	0,00	52.991,95
	Argamassa refratária	0,00	97,00
	Contrapiso	1.235,17	1.035,86
	Porcelanato e Revestimento cerâmico	307.265,77	347.711,08
	Rejunte	1.347,46	868,19
	Granito	57.309,10	57.309,10
	Pintura piso: látex-acrílica	0,00	1.221,43
	Massa PVA: Paredes	1.604,83	862,26
	Tinta acrílica: Parede e Teto	1.704,00	1.667,55
	Esmalte	124,34	241,68
	Revestimento pedra esculpida	0,00	240,86
	Revestimento: resina com resíduos de granitos e mármores	0,00	1.176,22
	Gesso em saco	0,00	9.305,67
	Chapa de gesso acartonado	104.896,54	76.366,34
	Massa PVA: Teto	2.860,62	2.168,53
	<b>PAG total</b>	<b>484.344,83</b>	<b>563.732,8</b>
<b>PAG TOTAL Estágio A4</b>		<b>1.095.739,68</b>	<b>1.222.381,39</b>
			<b>kg CO<sub>2</sub>-eq</b>

Ao avaliar os diferentes elementos da edificação, percebe-se que a fundação apresentou um aumento de 50,7%, sendo previsto um total de 23.442,47 kg CO<sub>2</sub>-eq de emissões e utilizado 35.347,61 kg CO<sub>2</sub>-eq. Em termos de participação percentual nas emissões totais do estágio A4, a fundação saiu de 2,10% nos dados de projeto para 2,89% com os dados reais, conforme apresentado na **Figura 35**.

Figura 35 - Percentual de participação nas emissões do estágio A4 por elemento da edificação.



Diferente do observado de A1 a A3, no estágio A4 o elemento fundação teve o aço como o maior contribuinte nas emissões, seguido pelo concreto e a brita tanto para projeto quanto em obra, conforme apresentado na **Figura 36 (A)**. Com os dados de projeto, o aço chegou a representar 61,94% das emissões, 14.521,22 kg CO<sub>2</sub>-eq, já em obra esse valor foi reduzido para 41,70%, atingindo 14.741,30 kg CO<sub>2</sub>-eq. Essa redução percentual deve-se principalmente ao maior uso do concreto em obra, sendo responsável por 39,97% das emissões, cerca de 14.128,60 kg CO<sub>2</sub>-eq. Já em projeto o concreto, que teve um menor quantitativo em m<sup>3</sup>, representou 32,98% das emissões para essa fonte de dados, atingindo 7.731,62 kg CO<sub>2</sub>-eq.

Embora o PAG da estrutura com dados reais de obra apresente um valor absoluto de emissões em kg CO<sub>2</sub>-eq superior ao estimado no projeto, sua participação percentual no PAG total da edificação foi menor. Isso se deve ao aumento proporcional das emissões da fundação, da envoltória e dos acabamentos internos durante a construção, o que resultou na redistribuição das contribuições percentuais entre os diferentes elementos da edificação.

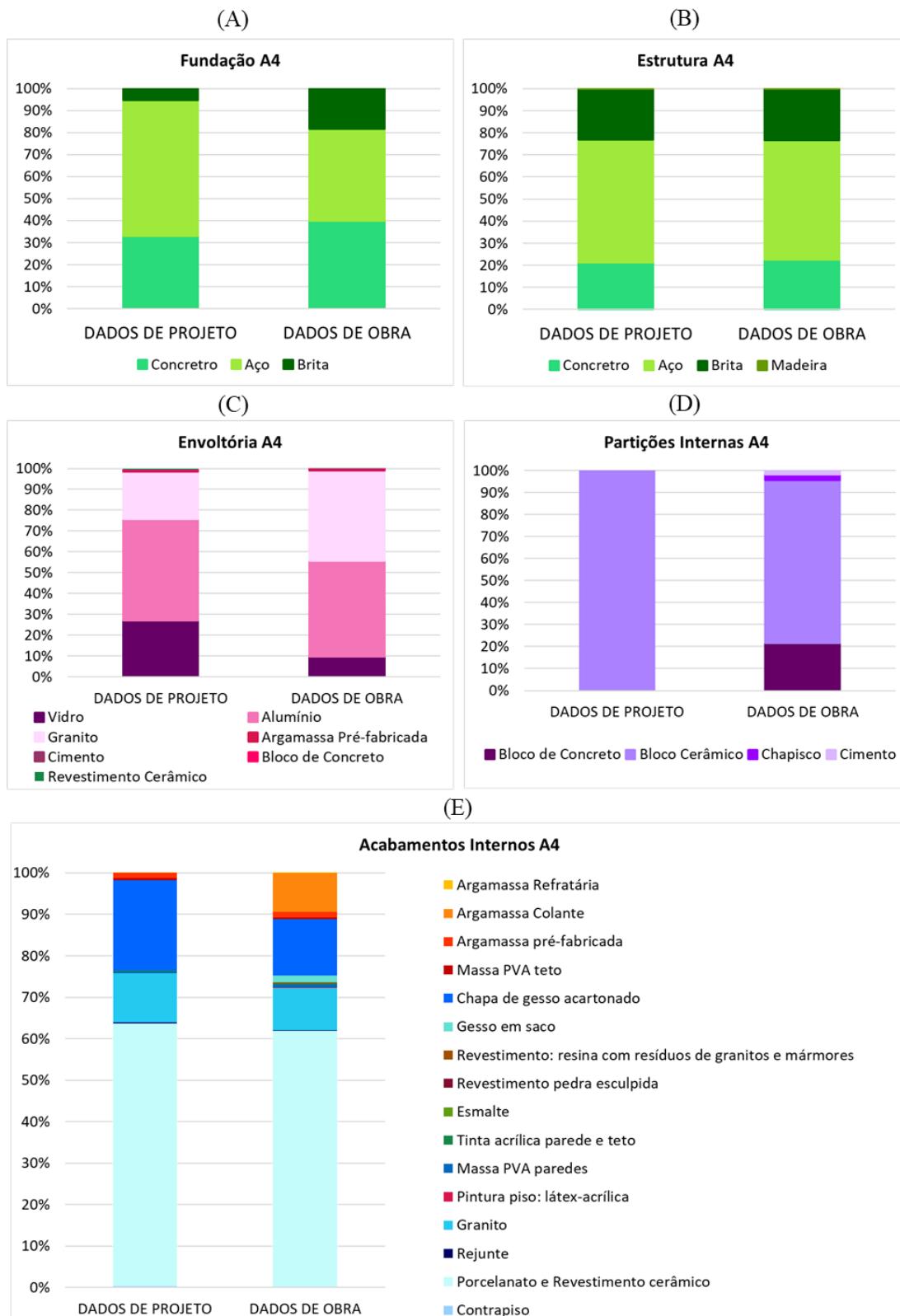
Na estrutura as emissões por material seguem uma relação proporcionalmente inversa, bem como na fundação. Enquanto nos estágios A1-A3, o concreto predominou como maior emissor na estrutura tanto em projeto quanto em obra, com 64,83% e 66,71% das emissões respectivamente, no estágio A4 suas emissões caíram para 21,34% e 22,66% respectivamente, tornando-o o segundo maior emissor do elemento, **Figura 36 (B)**.

Em contrapartida, o aço passou a ser o maior emissor no estágio A4 na estrutura, sendo responsável por 55,66% das emissões com dados de projeto e 53,95% das emissões com dados de obra, **Figura 36 (B)**. Anteriormente, nos estágios A1-A3 para a estrutura da edificação, o aço ficava com 33,39% das emissões em projeto e 31,46% em obra, representando assim, entre os estágios de produto e transporte, um aumento de 66,70% e 71,50% respectivamente.

No elemento envoltória, as emissões de obra foram 21,8% superiores às de projeto. Com esse aumento, a participação da envoltória nas emissões totais de A4 passou de 16,07%, dados de projeto, para 17,56% com dados de obra, o que pode ser explicado pelo maior volume de material efetivamente transportado para a obra. Por exemplo, no caso do alumínio, foram entregues 5,597 toneladas a mais do que o previsto no projeto. Para o granito, a diferença foi ainda maior, chegando a aproximadamente 110,68 toneladas quando considerados os valores

reais da obra. Esse acréscimo na carga transportada impacta diretamente os resultados do estágio A4, pois os cálculos levam em conta o valor de toneladas por quilômetro (t.km).

Figura 36 - Emissões embutidas de GEEs por elemento da edificação segundo os dados previstos e utilizados para o estágio A4.



O material responsável pela maior parte das emissões embutidas de GEEs no elemento envoltória no estágio A4 foi o alumínio. Para dados de projeto sua participação percentual nas emissões foi de 48,68% e 46,01% com dados de obra. A distância entre o fornecedor do alumínio até a obra era pequena, cerca de 10,80 km. Entretanto, a distância do fabricante até o fornecedor do material foi a mais longa, entre todos os materiais de todos os elementos, aproximadamente 5.234,00 km, fator esse que fez com que as emissões do transporte do alumínio sobressaissem disparadamente em relação aos outros materiais da envoltória.

Caso este estudo não tivesse acesso às notas fiscais no canteiro de obras, não teria sido possível identificar o fabricante do material e, talvez, a quantificação do transporte do alumínio teria sido feita apenas com base na distância entre fornecedor e canteiro de obras, distância essa 48,46% inferior à efetivamente percorrida para entrega.

Já o elemento partições internas foi o único que sofreu reduções no PAG do estágio A4. Com o projeto a estimativa foi de 70.337,34 kg CO<sub>2</sub>-eq, enquanto com os valores reais o PAG desse elemento reduziu para 52.242,60 kg CO<sub>2</sub>-eq, uma redução de 25,7%. Consequentemente, a participação desse elemento na soma total das emissões caiu de 6,30% para 4,27%, conforme apresentado na **Figura 34**. Embora os dados de projeto considerassem apenas os blocos cerâmicos, enquanto os dados de obra incluíssem outros três materiais, a redução ocorreu principalmente devido à logística do transporte dos blocos cerâmicos até o canteiro de obras, além da maior quantidade prevista no projeto.

Dentre todos os materiais desse elemento, os tijolos cerâmicos eram os que tinham a maior distância de transporte, com 193 km até a obra, pois foram adquiridos direto do fabricante. Além disso, a quantidade de tijolos cerâmicos utilizados foi cerca de 45% a menos que o previsto, o que resultou na redução das emissões neste item. Como o cálculo do estágio A4 considera o valor de toneladas por quilômetro (t.km), a estimativa de projeto do bloco cerâmico resultou em um valor 81,94% maior do que o obtido com os dados reais, reduzindo de 70.337,34 kg CO<sub>2</sub>-eq para 38.664,77 kg CO<sub>2</sub>-e, respectivamente.

O responsável pelo maior percentual de emissão no estágio A4 foi o item acabamentos internos. No projeto as emissões foram de 484.344,83 kg CO<sub>2</sub>-eq e as reais de tiveram um aumento de 16,2%, conforme apresentado na **Tabela 11**. Com essa variação, os acabamentos internos aumentaram sua participação nas emissões saindo de 43,48% para 46,12%, um percentual de 50% das emissões totais do transporte de materiais (**Figura 34**).

As emissões do acabamento interno englobaram não só a distância entre fornecedor e obra, mas também a distância entre o fabricante e o fornecedor, sendo que apenas 2 dos mais de 20 fabricantes, estão localizados em Brasília. Ademais, devido aos fatores já citados, o elemento acabamentos internos possui a maior distância percorrida total, dentre todos os elementos.

Em relação às emissões por material nos acabamentos internos o porcelanato e os revestimentos cerâmicos destacam-se como maiores emissores, responsáveis por 61,67% das emissões totais para dados de obra e 63,44% com dados de projeto, devido ao maior volume de material quantificado no orçamento prévio do que o efetivamente utilizado.

A compra desse material é feita diretamente na fábrica, localizada em Santa Catarina, cerca de 1668 km. Apesar do peso desse material representar cerca de 23% do total desse elemento, o fator distância foi crucial para o alto percentual de emissão do porcelanato.

Tanto para dados de projeto quanto de obra, a chapa de gesso acartonado foi o segundo maior emissor no transporte, representando 21,66% e 13,55% das emissões respectivamente. O granito, terceiro maior emissor, também obteve valores significativos, cerca de 11,83% das emissões de projeto e 10,17% das emissões de obra.

O granito, como citado anteriormente, é um material intensivo em carbono, e seu transporte, principalmente entre pontos mais afastados, reflete isso, principalmente pelo seu alto peso. Entretanto, as chapas de gesso acartonado surpreenderam ao possuir uma porcentagem nas emissões mais alta que do granito. Enquanto houve o transporte de 120 toneladas de granito a uma distância de 1201 km, as chapas de gesso acartonado, com cerca de 192 toneladas, percorreram 1003 km.

Ao comparar as emissões do estágio A4 com os estágios A1-A3, verifica-se que o transporte representa uma parcela relevante das emissões totais. No projeto, a somatória das emissões do estágio A1 ao A4 totalizaram 4.777.120,93 kg CO<sub>2</sub>-eq, dos quais 77,06% são provenientes dos estágios de produto, 3.681.381,25 kg CO<sub>2</sub>-eq, e 22,94% do estágio de transporte, 1.095.739,68 kg CO<sub>2</sub>-eq.

É importante observar que desses 4.777.120,93 kg CO<sub>2</sub>-eq, A1-A4 para dados de projeto, cerca de 50% é proveniente do estágio A1-A3 do elemento estrutura, destacando seu alto potencial de emissão, em especial pelo grande volume de concreto utilizado nesse elemento. O segundo de maior emissão foi o elemento acabamentos internos do estágio A1 ao A3, responsável por 10,88% desse total, e em terceiro o estágio A4 também do elemento

acabamentos internos, com um percentual de emissão de 10,35%. Os menores percentuais de projeto foram o estágio A4 da fundação, representando 0,5% do total, e as partições internas, com cerca de 1,5% das emissões.

Já nos dados de obra as emissões do estágio A1-A3 somadas ao estágio A4 totalizaram 5.595.411,08 kg CO<sub>2</sub>-eq, dos quais 78,15% são provenientes dos estágios A1-A3 e 21,85% do estágio A4, 1.222.381,39 kg CO<sub>2</sub>-eq. Comparando com os valores obtidos em obra com dados de projeto, as emissões dos estágios A1-A3 aumentaram cerca de 18,87%, saindo de 3.571.634,39 kg CO<sub>2</sub>-eq , no projeto, para 4.245.536,82 kg CO<sub>2</sub>-eq, na realidade da obra. Já no estágio A4 o aumento entre dados de projeto e dados reais foi menor, cerca de 11,56%, saindo de 1.095.739,68 kg CO<sub>2</sub>-eq para 1.222.376,98 kg CO<sub>2</sub>-eq, respectivamente.

Em uma análise das emissões em kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> de A1-A4 para cada elemento da edificação, a estrutura apresenta o maior valor de emissões. Nos dados de projeto, a estrutura atingiu 192,25 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, com os estágios A1-A3 sendo predominantes com 168,20 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>. A fundação, envoltória e as partições internas possuem emissões em torno de 17,55 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, 36,27 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, e 20,24 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> na somatória de A1-A4 respectivamente. Nesses elementos os estágios A1-A3 continuam como as emissões mais representativas, alcançando 15,90 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, 23,87 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> e 15,29 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, respectivamente.

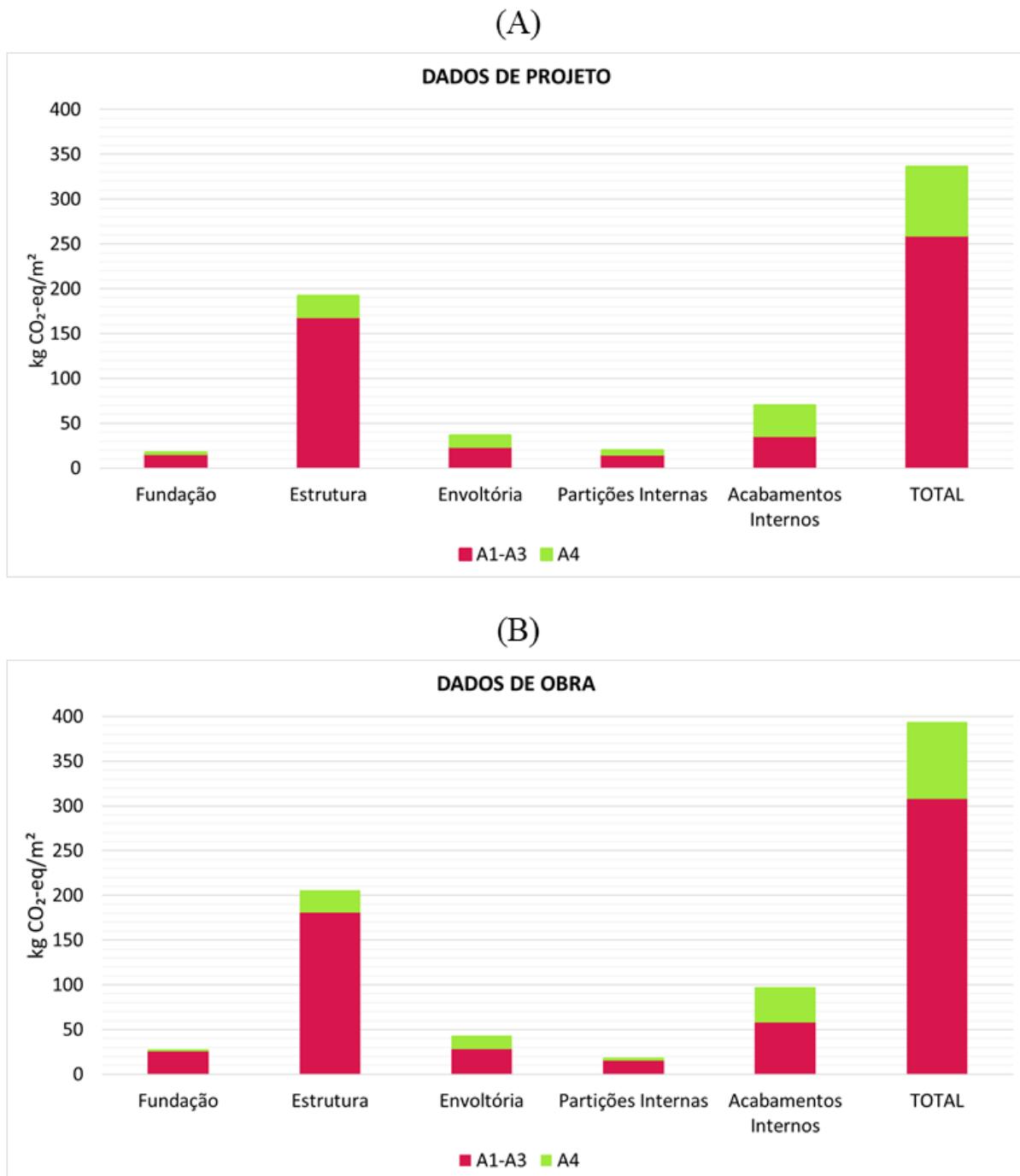
Já os acabamentos internos se destacam como o segundo maior contribuinte para dados de projeto, com 35,92 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> de A1-A3 e 34,10 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> para o estágio A4, totalizando 70,02 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>. No total, as emissões da edificação, considerando os estágios A1-A4 e todos os elementos analisados, chegam a 336,33 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> com os dados de projeto, conforme apresentado na **Figura 37 (A)**.

Ao comparar as emissões dos dados de projeto com os dados de obra, observa-se um aumento nas emissões totais. Na somatória das emissões de A1-A4 esse aumento foi de 17,13%. Esse aumento é altamente relevante nos acabamentos internos, que passaram a registrar 58,11 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> (A1-A3) e 39,69 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> (A4) em obra, um aumento de 61,8% nas emissões por m<sup>2</sup>, indicando um maior consumo efetivo de materiais nesse elemento.

Para os dados de obra, **Figura 37 (B)**, a estrutura manteve-se como a principal responsável pelas emissões totais de A1-A4, com valor 7,03% superior ao de projeto, totalizando de 205,77 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>. A envoltória apresentou um aumento superior ao da estrutura, onde as emissões de obra dos estágios de produto e transporte foram 18,75%

superiores, saindo de 36,27 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> em projeto para 43,07 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>. O elemento partições internas foi o único que apresentou redução para dados de obra, saindo de 20,24 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, para dados de projeto, e atingindo 19,08 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> em obra, uma redução de 5,73%.

Figura 37 - Comparativo das emissões embutidas de GEEs do estágio A1-A3 e A4 para dados de projeto e obra por elemento.

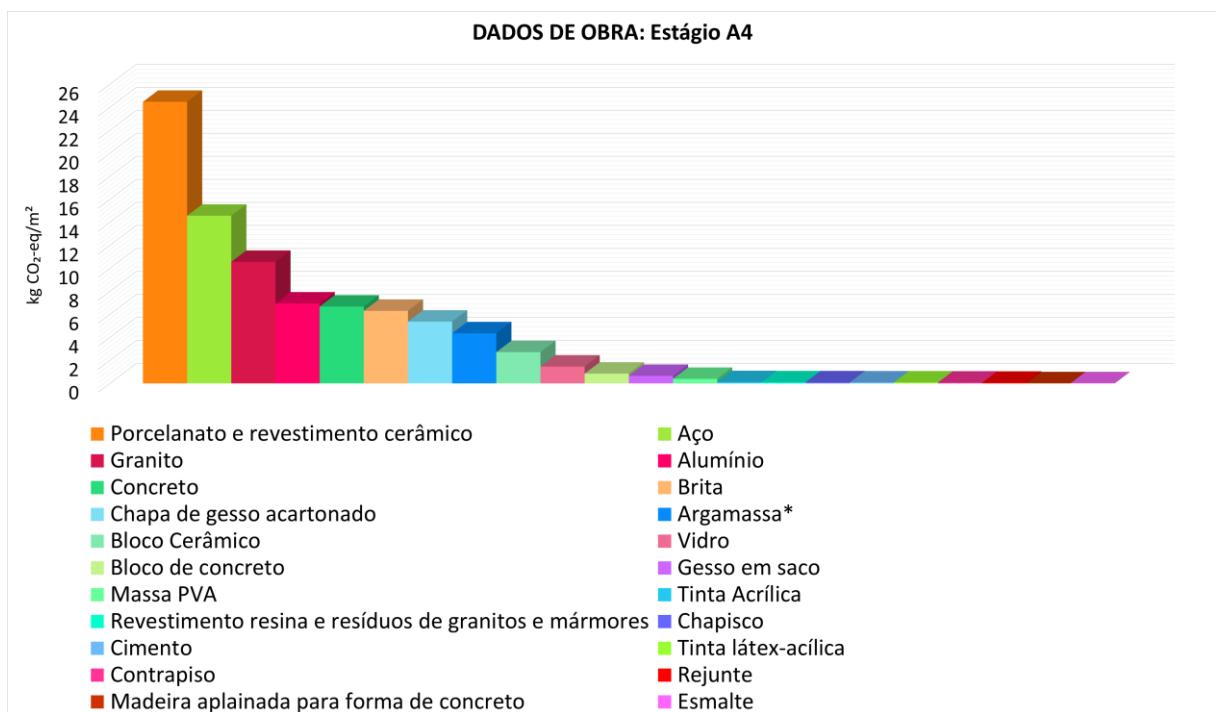


Assim como já observado nos resultados dos estágios A1-A3, o grande volume de concreto efetivamente utilizado em obra no elemento fundação acarretou grandes diferenças entre os resultados de cada fonte de dados.

No comparativo feito na **Figura 37** destaca-se o aumento de 60,80% nas emissões do elemento fundação por m<sup>2</sup>, saindo de 17,55 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> (A1-A4), com dados de projeto, e chegando a 28,22 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> (A1-A4) com dados de obra, sendo que, desse total, em obra 25,73 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> são provenientes dos estágios de produto e apenas 2,49 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> do estágio de transporte.

Ao analisar as emissões em kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> por material no estágio A4 com dados de obra, observa-se uma mudança expressiva em relação ao estágio A1-A3. No estágio de produto, concreto, aço e granito foram os principais emissores. Já no transporte (**Figura 38**), porcelanatos e revestimentos cerâmicos lideram, com 24,48 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, seguidos pelo aço com 14,58 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> e o granito, bem como no estágio de produto, segue como terceiro maior emissor com cerca de 10,57 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>. O principal fator que justifica essas alterações entre os maiores emissores é a distância de transporte do produto entre fábrica, fornecedor e obra, ou fábrica e obra.

Figura 38 - Emissões por material construtivo por m<sup>2</sup> para dados de obra nos estágios A4.



Apesar dessas mudanças, a mais notável é a do alumínio, que passou de 8º maior emissor no estágio A1-A3 para o quarto maior emissor no estágio A4, com 6,95 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>. Isso ressalta a influência do transporte nas emissões totais do alumínio. Embora a produção do material no Brasil tenha uma pegada de carbono relativamente baixa nos estágios A1-A3, especialmente devido ao uso predominante de energia hidrelétrica no processo de fabricação, seu impacto pode aumentar consideravelmente no estágio A4 devido ao grande volume utilizado e a grande quilometragem percorrida entre fabricante e canteiro de obras, distância essa superior a 5.000,00 km.

Esse aumento ocorre quando o transporte envolve longas distâncias, seja pela localização dos fornecedores e fabricantes distantes do canteiro de obras ou pela necessidade de múltiplos deslocamentos até o destino final. Assim, mesmo um material com fator de carbono reduzido na fase de produção pode se tornar grande emissor ao longo do ciclo de vida da edificação, caso sua logística não seja otimizada, reforçando a importância de estratégias que priorizem fornecedores locais e meios de transporte mais eficientes.

Apesar do valor total das emissões de transporte, o estágio de produto foi o de maior impacto em relação a suas emissões embutidas de GEEs. A possibilidade de acessar as notas fiscais diretamente no canteiro de obras foi um diferencial determinante para a precisão dos dados, permitindo identificar a origem exata dos materiais, os fornecedores e os fabricantes.

Os resultados mostram a limitação de análises baseadas exclusivamente em orçamentos, pois estes são elaborados em etapas preliminares aos projetos executivos, simulações computacionais e escolhas de materiais, muitas vezes baseados em experiências do orçamentista, ou em obras anteriores, evidenciando a necessidade de estudos que integrem informações provenientes de dados consolidados na prática construtiva.

No contexto da construção civil, setor historicamente responsável por consideráveis impactos ambientais, torna-se imperativo o aprimoramento de estudos que conciliam estimativas orçamentárias com dados reais, permitindo avaliações mais precisas.

#### 4.1.3.1 Estágio A5

A quantificação das emissões de carbono nos processos construtivos é fundamental para compreender o impacto ambiental da edificação ao longo de seu ciclo de vida. O estágio A5, que abrange as atividades realizadas no canteiro de obras, pode representar uma parcela significativa das emissões totais, especialmente devido ao consumo de energia, uso de materiais

e geração de resíduos. A análise detalhada desse estágio permite identificar oportunidades para otimizar processos, reduzir desperdícios e adotar práticas mais sustentáveis. Com base em dados reais, as emissões do estágio A5 foram quantificadas. A **Figura 39** apresenta as emissões por fator analisado e a **Figura 40** a participação percentual de cada componente nas emissões totais desse estágio.

Figura 39 - Emissões por fator analisado no estágio A5.

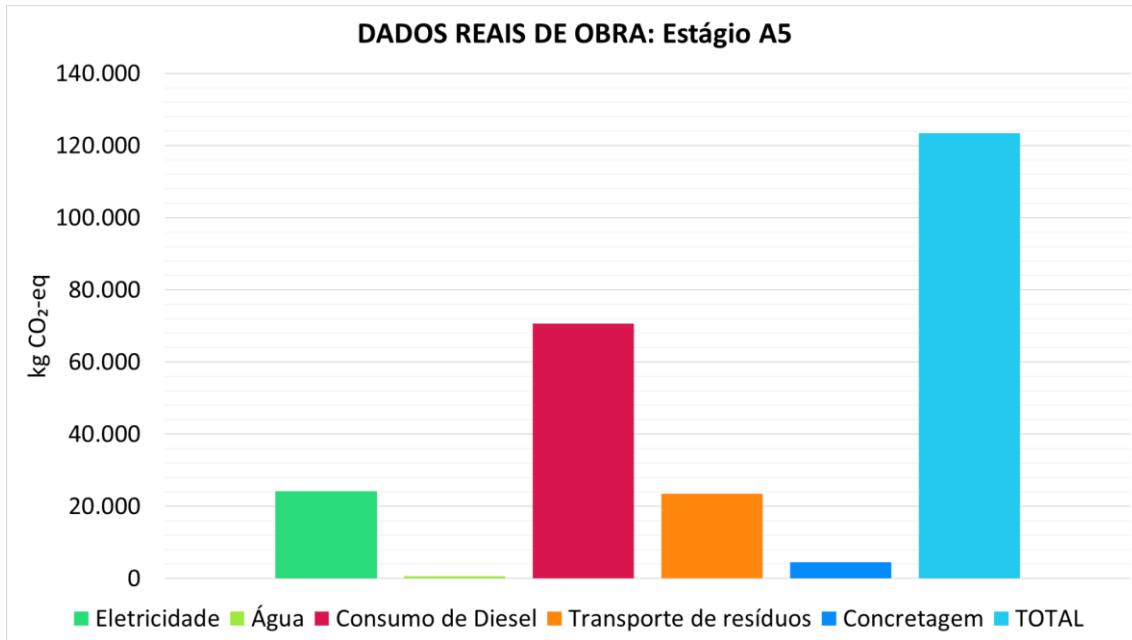
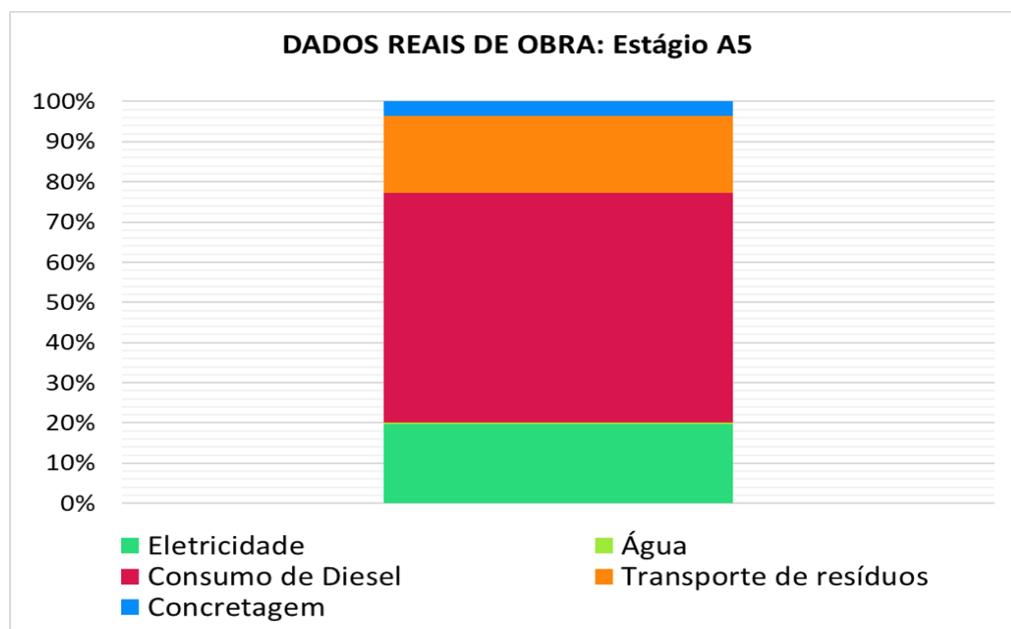


Figura 40 - Participação percentual de cada componente do estágio A5.

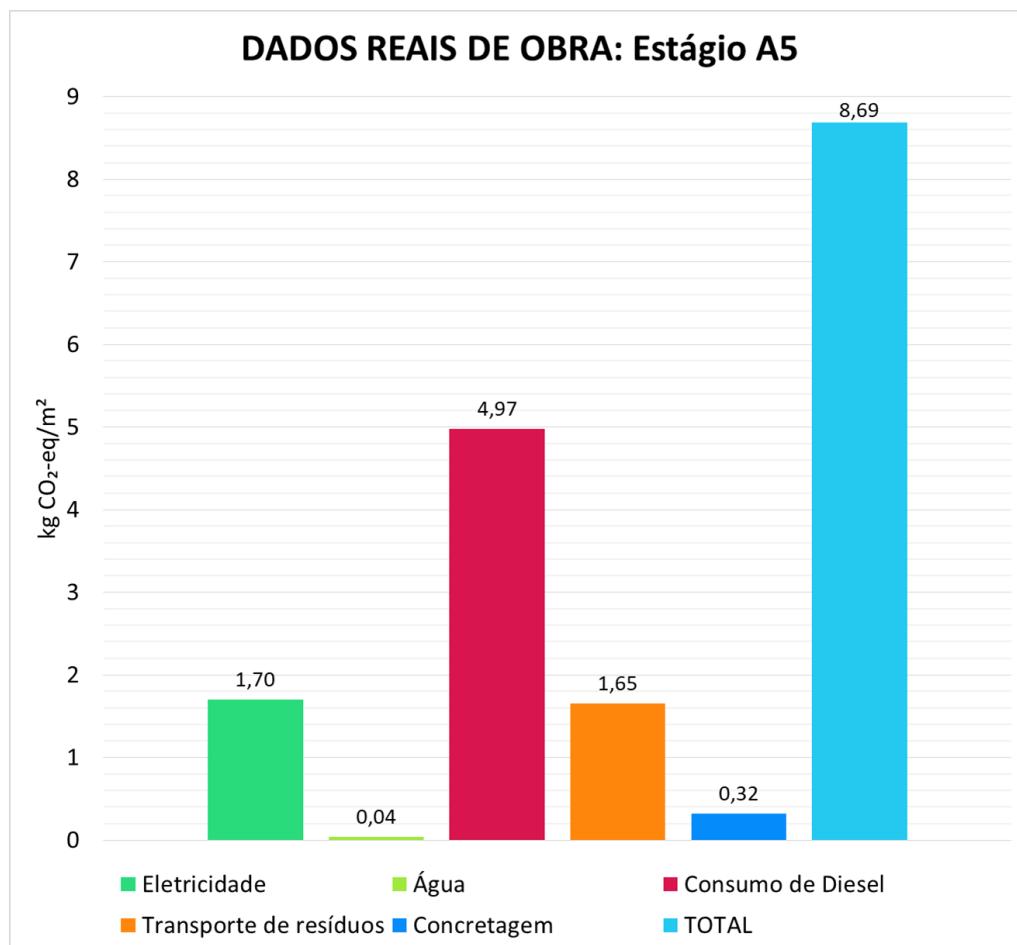


O total de emissões no estágio A5 corresponde a 123.411,78 kg CO<sub>2</sub>-eq, com

significativa variação entre os diferentes fatores analisados. O consumo de diesel se destacou como a principal fonte de emissões, contribuindo com 70.652,07 kg CO<sub>2</sub>-eq, o que representa 57,25% do total. Esse dado reflete a alta dependência de combustíveis fósseis no transporte de materiais, operação de equipamentos e outros processos construtivos que utilizam maquinário pesado.

Quando analisadas em relação à área construída, essas emissões correspondem a 4,97 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, conforme apresentado na **Figura 41**, consolidando o diesel como o fator mais impactante no estágio A5.

Figura 41 - Emissões do estágio A5 por m<sup>2</sup> de área construída da edificação.



A eletricidade também apresentou um impacto relevante, respondendo por 24.174,92 kg CO<sub>2</sub>-eq, equivalente a 19,59% das emissões totais, o que equivale a 1,70 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>. Esse valor indica que, embora o Brasil possua uma matriz energética majoritariamente renovável, o consumo de energia elétrica no canteiro de obras ainda representa uma parcela expressiva das emissões.

Já o transporte de resíduos gerou 23.469,60 kg CO<sub>2</sub>-eq, correspondendo a 19,02% do total e a 1,65 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, evidenciando a relevância da gestão de resíduos na redução do impacto ambiental.

A análise dos dados evidencia que o transporte e a utilização de combustíveis fósseis são os principais desafios para a redução de emissões nos processos construtivos. Estratégias como a adoção de equipamentos elétricos ou híbridos, a priorização de fornecedores locais para minimizar deslocamentos e a otimização da logística de resíduos podem contribuir significativamente para mitigar esse impacto.

Além disso, a busca por fontes de energia mais limpas no canteiro de obras, como o uso de energias renováveis e a eficiência energética, pode representar um avanço na sustentabilidade da construção civil. Outra alternativa promissora é a substituição parcial ou total do diesel fóssil por biocombustíveis, como o biodiesel ou o HVO (óleo vegetal hidrotratado), que podem reduzir as emissões associadas ao transporte e operação de maquinário pesado. O total de emissões do estágio A5 em relação à área construída resultou em 8,69 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, valor relativamente inferior aos obtidos nos estágios A1-A3 e A4, entretanto de certa relevância na pegada de carbono da edificação e com grandes possibilidades de redução.

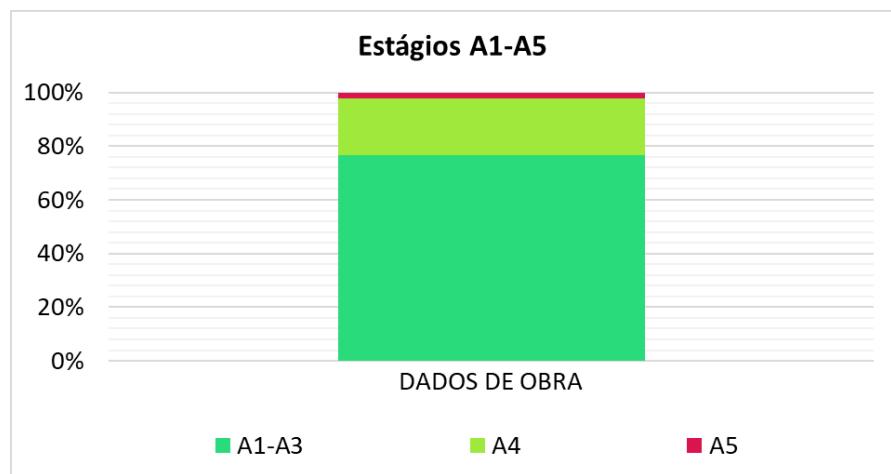
#### **4.1.4 Emissões embutidas de GEEs: Estágio A1-A5**

##### **4.1.3.1 Dados de obra (reais)**

As emissões embutidas de GEEs da edificação avaliada no presente estudo nos estágios A1 até A5, considerando os dados de obra (reais), totalizaram quase 5,6 milhões de kg CO<sub>2</sub>-eq, sendo 75,94% nos estágios de produtos, 21,86% do estágio de transporte e apenas 2,21% dos processos construtivos, conforme apresentado na **Figura 42**.

Os dados afirmam que os estágios de produto representam a maior fonte de emissões, semelhante aos resultados obtidos por Illankoon *et al.* (2023) e Chen *et al.* (2022). As emissões dos estágios de produto totalizaram cerca de 4,3 milhões de kg CO<sub>2</sub>-eq, valor esse que é 257,73% maior que as emissões do transporte e mais de 3.400% superior às emissões dos processos construtivos, revelando a importância de atuação nos estágios de produtos para redução das emissões embutidas de GEEs nas edificações.

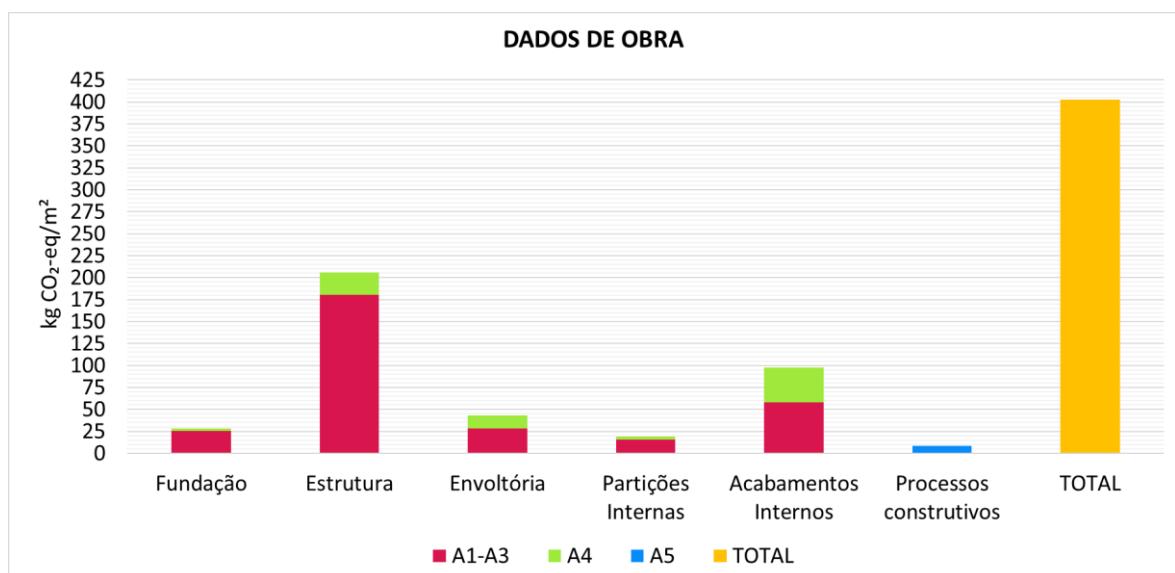
Figura 42 - Percentual de participação de cada estágio no PAG total da edificação para dados de obra.



Chen *et al.* (2022) analisaram as emissões dos estágios A1-A5 considerando a fundação, laje e paredes de uma edificação residencial multifamiliar em concreto localizada em Shanghai, tendo verificado que 85,44% das emissões analisadas foram provenientes dos estágios A1-A3, 11,61% do estágio A4 e 2,93% do A5. Essa distribuição percentual na participação das emissões por estágios se assemelha às observadas no presente estudo, onde os estágios de produtos (A1, A2 e A3) acumulam a maior parte das emissões.

A **Figura 43** apresenta a contribuição de cada elemento para as emissões totais da edificação em obra, expressas em kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> de área construída de acordo com os estágios analisados.

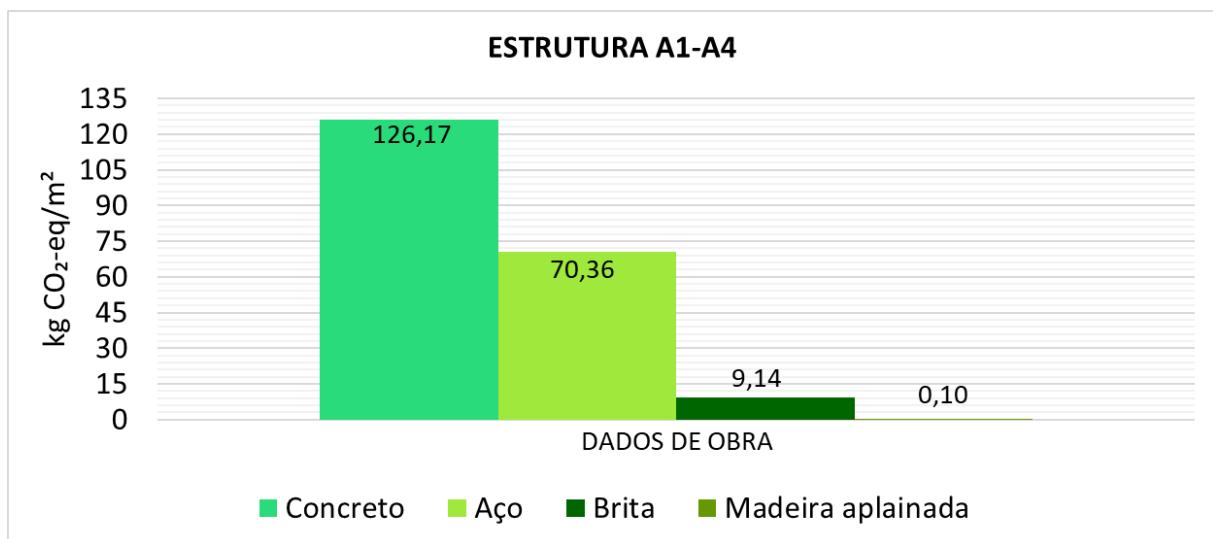
Figura 43 - Somatória das emissões embutidas de GEEs da edificação por m<sup>2</sup> de área construída para cada estágio do ciclo de vida analisado.



Pode-se observar que o elemento estrutura se destaca como o principal responsável por essas emissões, totalizando 205,77 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, dos quais 180,68 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> correspondem aos estágios A1-A3 e 25,10 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> ao estágio A4. Essa predominância se deve, sobretudo, ao alto consumo de concreto e aço nos estágios iniciais (A1-A3), materiais que, conforme demonstrado nas análises anteriores, exercem um impacto significativo nas emissões de carbono.

Dentro do estágio A1-A3, o valor das emissões por metro quadrado do concreto referente à estrutura chama atenção, atingindo 120,49 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, representando 40,30% das emissões totais do estágio de produto. Quando analisado no contexto das emissões embutidas de A1 a A4, conforme apresentado na **Figura 44**, as emissões do concreto da estrutura sobem para 126,17 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>. O aço, segundo material de maior emissão, alcançou 70,36 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> de A1-A4. Ambos materiais apresentam um alto valor de emissão por m<sup>2</sup>, diante da grande quantidade de materiais analisados no estudo.

Figura 44 - Emissões por material do elemento estrutura por m<sup>2</sup> de área construída com dados de obra.



Na **Tabela 12** é possível analisar as emissões embutidas em kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> de área construída para cada material, indo do estágio A1-A3, A4 e a somatória das emissões de A1-A4, onde (FD) refere-se a fundação, (ES) estrutura, (EN) envoltória, (PT) partições internas e (AI) acabamentos internos. Cada valor foi classificado de acordo com a seguinte escala: emissão alta: > 40 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>; emissão média superior: 15,01 a 40 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>; emissão média inferior: 5,01 a 15 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>; emissão baixa: 1 a 5 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>; e emissão baixa inferior: < 1 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>.

Tabela 12 - Emissões embutidas em kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> de área construída para cada material.

	A1-A3	A4	A1-A4
	kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>2</sup>	kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>2</sup>	kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>2</sup>
Concreto (FD)	21,14	0,99	22,14
Aço (FD)	3,35	1,04	5,39
Brita (FD)	0,46	0,46	0,91
Concreto (ES)	120,49	5,69	126,17
Aço (ES)	56,82	13,54	70,36
Brita (ES)	3,29	5,85	9,14
Madeira aplainada (ES)	0,08	0,02	0,10
Vidro (EN)	3,87	1,47	5,34
Alumínio (EN)	8,91	6,95	15,86
Granito (EN)	13,23	6,53	19,76
Argamassa pré-fabricada (EN)	0,86	0,06	0,93
Cimento (EN)	0,76	0,02	0,78
Bloco de concreto (EN)	0,32	0,06	0,38
Revestimento cerâmico (EN)	0,01	0,01	0,02
Bloco de concreto (PT)	4,38	0,79	5,17
Bloco cerâmico (PT)	8,38	2,72	11,10
Chapisco (PT)	0,48	0,10	0,58
Cimento (PT)	2,11	0,06	2,18
Portas (PT)	0,05	0,00	2,05
Argamassa pré-fabricada (AI)	7,65	0,56	8,21
Argamassa colante (AI)	5,51	3,73	9,24
Argamassa refratária (AI)	0,05	0,01	0,06
Contrapiso (AI)	1,08	0,07	1,015
Rejunte (AI)	0,09	0,06	0,15
Tinta látex-acrílica (AI)	1,11	0,09	1,19
Porcelanato e revestimento cerâmico (AI)	17,72	24,48	42,20
Massa PVA parede (AI)	2,05	0,24	2,30
Tinta acrílica parede e teto (AI)	11,24	0,11	11,35
Esmalte (AI)	0,21	0,02	0,23
Revestimento pedra esculpida (AI)	0,06	0,02	0,08
Revestimento em resina e resíduos de granito e mármore (AI)	0,28	0,08	0,36
Gesso em saco (AI)	0,25	0,66	0,91
Chapa de gesso acartonado (AI)	2,51	5,38	7,89
Massa PVA teto (AI)	0,14	0,15	0,29
Granito (AI)	8,17	4,03	12,20
	Emissão alta: > 40 kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>2</sup>		
	Emissão média superior: 15,01 a 40 kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>2</sup>		
	Emissão média inferior: 5,01 a 15 kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>2</sup>		
	emissão baixa: 1 a 5 kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>2</sup>		
	emissão baixa inferior: < 1 kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>2</sup>		

O estudo conduzido por Faria (2023) analisou os estágios A1-A3 de edificações no mesmo bairro avaliado na presente pesquisa. Os resultados obtidos apontaram emissões de 220,89 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> para o elemento estrutura, um valor 6,84% superior ao encontrado nesta pesquisa quando considerados os estágios A1-A4. No entanto, ao restringir a comparação apenas ao estágio de produto (A1-A3), a diferença percentual cresce para 22,25%.

Em relação aos materiais, Faria (2023) obteve 149,38 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> para o concreto da estrutura de A1-A3 e 71,51 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> para o aço também da estrutura de A1-A3. Esses valores se assemelham aos obtidos neste estudo, com uma variação de 23,98% para o concreto e 25,85% para o aço.

Mao *et al.* (2013) indicaram que edificações com componentes pré-fabricados em suas estruturas tendem a gerar menos emissões embutidas em relação aos sistemas estruturais tradicionais. A diminuição desse impacto pode ficar entre 2% e 5% quando há pré-fabricação parcial e chegar a valores entre 20% e 50% em construções com um alto grau de pré-fabricação, representando assim uma oportunidade para redução das emissões.

Os acabamentos internos aparecem como o segundo maior contribuinte para as emissões, sendo responsáveis por 97,80 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> no ciclo A1-A4. Esse valor representa uma redução de aproximadamente 52,48% em relação às emissões da estrutura, mas ainda assim, se mantém significativo. O estágio de produto continua sendo o mais impactante, com 58,11 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> no estágio A1-A3 e 39,69 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> no estágio A4, sendo este o maior valor de emissões por metro quadrado para o estágio A4.

Esse impacto elevado decorre da ampla variedade de materiais construtivos empregados, muitos dos quais apresentam alto fator de carbono, como granito e porcelanato, das grandes quantidades utilizadas e das longas distâncias percorridas para a entrega desses materiais ao canteiro de obras. De todas as distâncias contabilizadas para o inventário do estágio A4 neste estudo, as maiores distâncias foram observadas nas entregas dos materiais do elemento acabamentos internos.

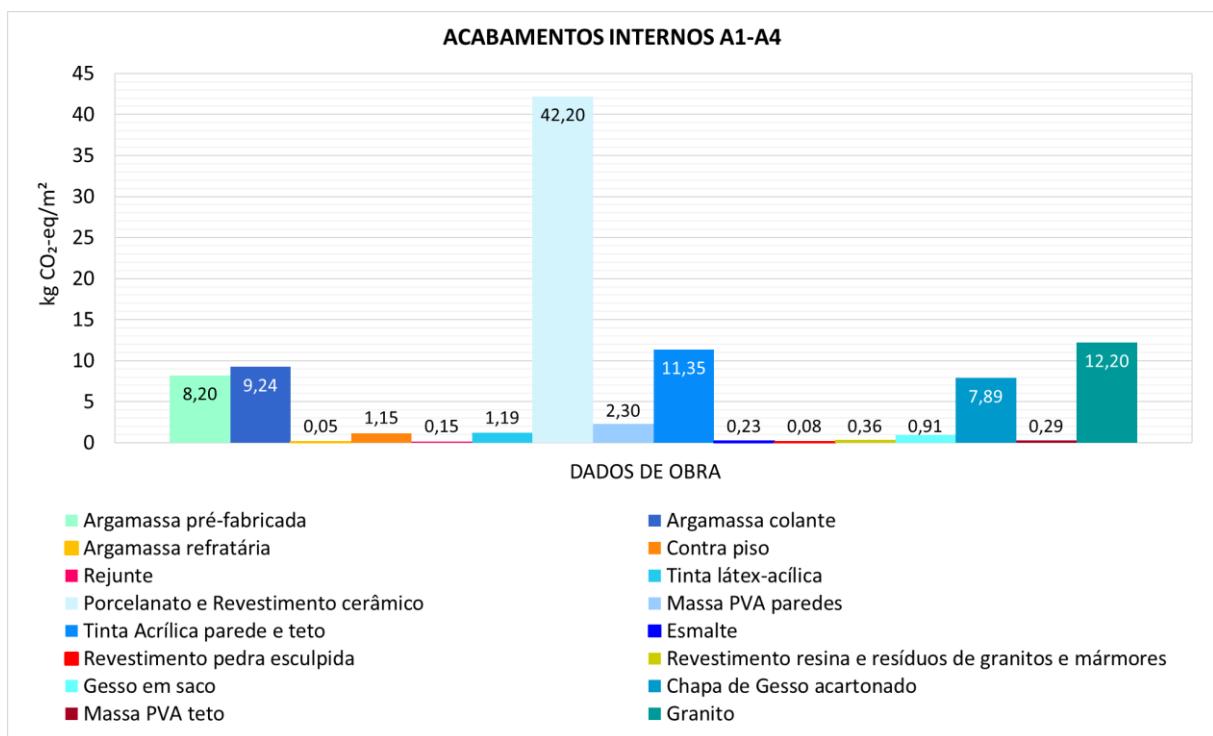
A combinação desses fatores justifica o alto valor de emissões embutidas de GEEs associado aos acabamentos internos, reforçando sua relevância nas emissões totais da edificação e a necessidade de adotar estratégias para mitigar esse impacto.

Reducir as distâncias de entrega dos materiais pode colaborar significativamente para a diminuição das emissões associadas ao transporte, assim como a adoção de caminhões movidos

a biocombustível, que emitem menos gases de efeito estufa em comparação aos veículos a diesel. Essas medidas, aliadas à escolha de materiais com menor pegada de carbono e ao uso de insumos reciclados ou regionais, podem contribuir para uma construção mais sustentável e alinhada com os princípios da economia circular.

A **Figura 45** apresenta as emissões embutidas de GEEs em kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> dos diferentes materiais utilizados nos acabamentos internos (A1-A4). Dentre os materiais analisados, o porcelanato e o revestimento cerâmico se destacam como os de maior emissão, chegando a 42,20 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, o que pode ser atribuído ao alto consumo de energia em sua fabricação e transporte.

Figura 45 - Emissões de A1-A4 por material do elemento acabamentos internos por m<sup>2</sup> de área construída com dados de obra.

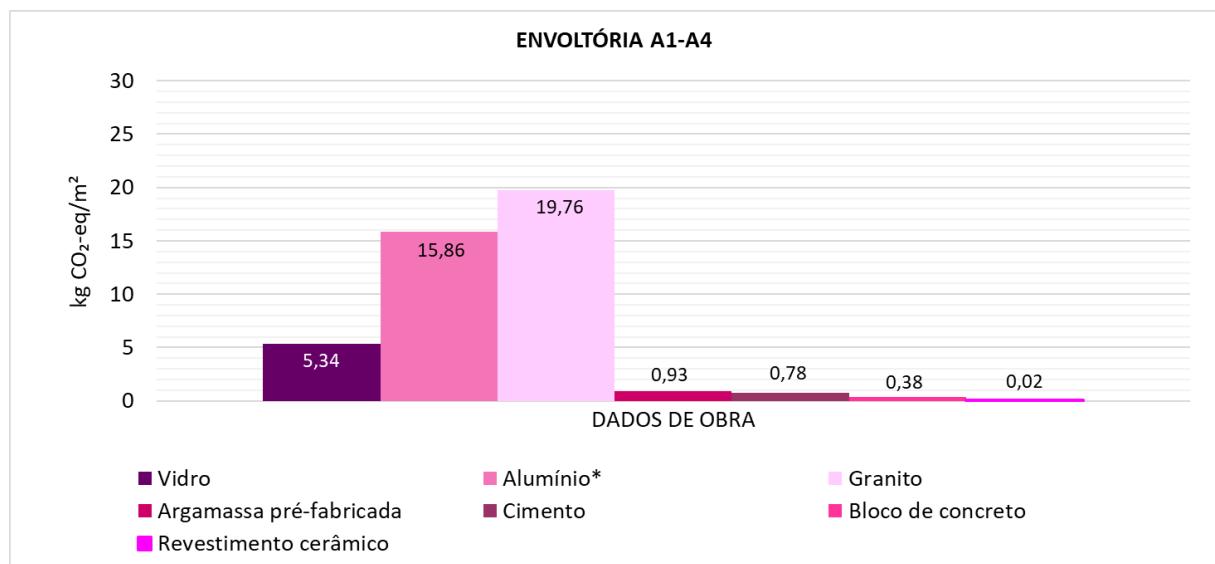


O granito também apresenta uma elevada emissão por m<sup>2</sup>, cerca de 12,20 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, principalmente pelo alto valor das emissões de transporte. Além disso, o revestimento feito com resina e resíduos de granitos e mármores (7,89 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>) surge como uma alternativa interessante, pois apresenta impacto inferior ao do granito puro, sugerindo que o reaproveitamento de resíduos pode ser uma estratégia viável para reduzir as emissões associadas aos acabamentos internos.

O terceiro maior emissor deste estudo foi a envoltória, sendo responsável por 43,07 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> (A1-A4), **Figura 46**, dois quais 27,96 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> são provenientes do estágio A1-A3 e 15,11 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> do estágio A4. Comparando os resultados, de A1 a A3, com os obtidos por Faria (2023), observa-se uma diferença cerca de 6,01%, onde os resultados obtidos pela autora foram maiores do que os do presente estudo, chegando a 29,64 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>.

É importante ressaltar que, dos 27,96 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> da envoltória (A1-A4), 19,76 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> são provenientes das emissões do granito, material com alto fator de carbono principalmente no estágio de produto, e 15,86 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> do alumínio, representado na **Figura 46** pela somatória do alumínio empregado nas esquadrias, brises e requadros da envoltória.

Figura 46 - Emissões por material do elemento envoltória por m<sup>2</sup> de área construída com dados de obra.



Embora o estudo de caso desta pesquisa apresente um alto PAF e utilize uma grande quantidade de vidro em sua envoltória, a edificação analisada por Faria (2023), que possui um PAF inferior, empregou um volume significativamente maior de blocos de concreto, totalizando cerca de 1139 toneladas a mais. Esse fator teve um impacto direto nas emissões associadas à envoltória da edificação. No estudo de Faria (2023), os blocos de concreto contribuíram com 12,23 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, enquanto, no presente estudo, as emissões desse mesmo material foram consideravelmente menores, limitando-se a 0,32 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> nos dados de obra, devido ao seu uso reduzido.

A comparação entre os dois estudos, considerando que se tratam da mesma tipologia de edificação e estão localizados na mesma região, reforça a influência significativa da escolha dos materiais na pegada de carbono da construção. O uso extensivo de blocos de concreto na envoltória pode, de fato, aumentar substancialmente as emissões associadas à edificação, escalonando seu impacto ambiental.

No presente estudo, o material da envoltória de maior emissão por metro quadrado de área construída foi o granito, atingindo 19,76 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> de A1-A4, dos quais 13,23 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> são do estágio de produto (66,95%) e 6,53 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> do estágio de transporte (30,05%).

O alumínio, representada no **Figura 46** pela somatória do alumínio empregado nas esquarras, brises e quadros da envoltória, foi o segundo maior emissor, atingindo 15,86 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, dos quais 56,16% são provenientes do estágio de produto (8,61 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>) e 43,84% do estágio de transporte (6,95 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>). Apesar do alto valor de PAF da envoltória da edificação analisada, o vidro foi o terceiro maior emissor por m<sup>2</sup>, atingindo 5,34 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>.

A fundação, embora seja o terceiro maior emissor ao se considerar as emissões por metro quadrado de área construída nos estágios A1-A3, com 25,73 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, ocupa a quarta posição quando se analisa o panorama geral das emissões, totalizando 28,22 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>. Esse posicionamento se deve ao fato de o estágio de transporte da fundação não apresentar um valor significativo de emissões, atingindo aproximadamente 2,49 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>.

Se compararmos os valores obtidos para a fundação com dados de obra neste estudo ao de Faria (2023), observa-se que, mesmo considerando apenas as etapas A1-A3, Faria (2023) registrou emissões por metro quadrado 15,31% superiores às encontradas aqui, totalizando 32,54 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>. Essa diferença pode ser explicada, principalmente, pela maior área da edificação analisada por Faria (2023), que é aproximadamente 11,41% superior à deste estudo, resultando em um maior consumo de materiais e, consequentemente, em emissões mais elevadas na fase de produção, que se destaca como a principal responsável pelas emissões nos casos analisados.

Além disso, mesmo tratando-se da mesma tipologia edilícia, essa variação também pode estar relacionada a diferenças no tipo de fundação adotado, eventuais intercorrências ao longo

da obra e variações nas proporções de uso dos materiais, fatores que influenciam diretamente no total de emissões geradas.

Frischknecht *et al.* (2020) analisaram uma edificação residencial multifamiliar na China e concluiram que o valor de emissões de A1-A3 para a fundação pode ficar entre 30,66 e 94,17 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>. Em comparação, o valor total de A1 a A4 encontrado no presente estudo ficou abaixo desses valores, uma vez que totalizou 28,22 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, cerca de 7,96% abaixo do valor mínimo sugerido pelo autor.

Similar ao observado na estrutura da edificação, no elemento fundação o concreto segue em destaque sendo o maior contribuinte nas emissões por metro quadrado de área construída, atingindo 22,14 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> de A1-A4. Em um panorama geral, somando as emissões obtidas para o material concreto de A1-A4 e as comparando com as emissões totais obtidas na somatória de A1-A5, esse material atinge cerca de 148,31 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, representando 37,67% das emissões embutidas de GEEs totais da edificação analisada, conforme apresentado na

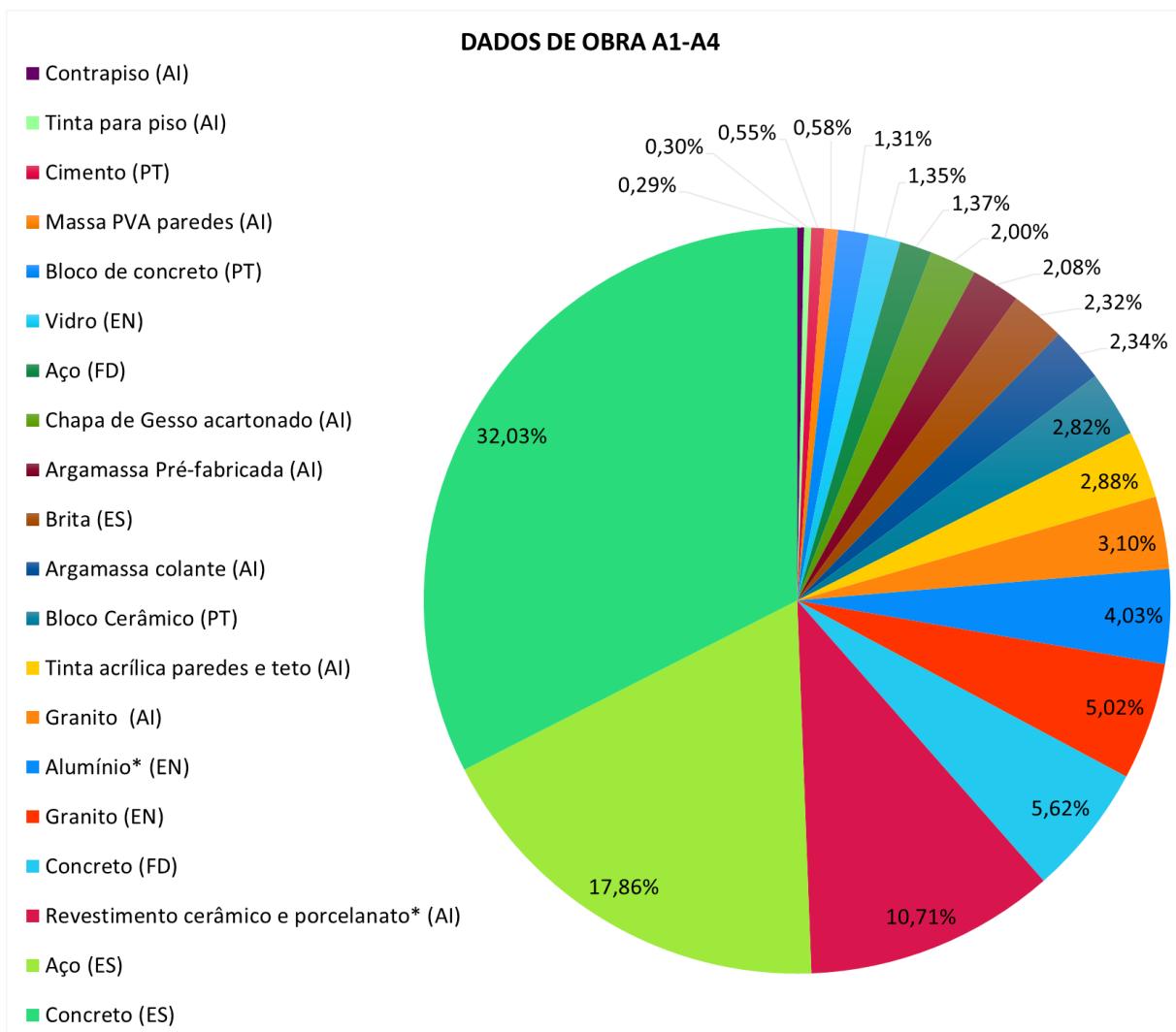
**Figura 47.**

A somatória das emissões provenientes do aço atingiu 19,31%, representando cerca de 75,75 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, sendo o segundo maior contribuinte, seguido pelo granito e argamassa, porém com percentuais bem mais baixos, de 8,12% e 4,68% respectivamente. Na

**Figura 47**, para o granito considerou-se a somatória de todo o granito empregado na edificação, e para a argamassa considerou-se a somatória de todos os tipos de argamassa utilizada.

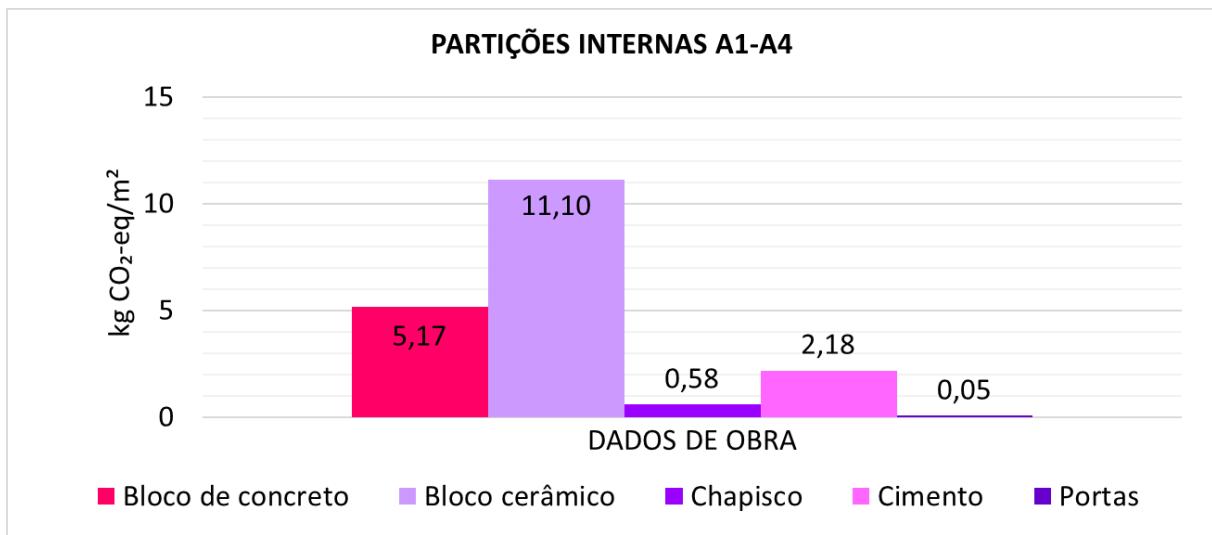
Analizando essas informações, constata-se que o concreto desponta com alto percentual de participação nas emissões embutidas totais. Puettmann *et al.* (2021) também obteve constatações semelhantes em seu estudo, o autor analisou a estrutura, fundações, paredes externas e internas de edificações de 8,12 e 18 pavimentos em concreto do estágio A1-A5 e concluiu que o concreto chegou a representar até 74% do total das emissões.

**Figura 47** - Percentual de participação nas emissões totais da edificação analisada com dados de obra.



Apesar do elemento partições internas, **Figura 48**, apresentar o menor valor de emissões por m<sup>2</sup> dentre as emissões do estágio A1-A4, suas emissões são relevantes para uma visão geral da edificação. Ao total, as partições internas foram responsáveis por 19,08 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, dos quais 80,71% são provenientes da etapa de produto e 19,29% da etapa de transporte. O bloco cerâmico atingiu 11,10 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, valor mais alto dentre os materiais desse elemento, seguido pelo bloco de concreto com 5,17 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>. O cimento (2,18 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>), o chapisco (0,58 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>) e as portas (0,05 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>) apresentaram valores menos expressivos, como mostrado na **Figura 48**.

Figura 48 - Emissões por material do elemento partições internas por m<sup>2</sup> de área construída com dados de obra.



Conclui-se, portanto, que, embora o elemento partições internas represente a menor contribuição por metro quadrado entre os avaliados, sua composição material ainda exerce influência significativa no total de emissões da edificação. O uso predominante de blocos cerâmicos e de concreto concentra a maior parte desse impacto, indicando oportunidades para otimização na escolha de materiais ou na logística de transporte. Assim, mesmo elementos secundários da edificação devem ser considerados cuidadosamente em estratégias de redução das emissões de carbono.

#### 4.1.3.2 Dados de projeto (DP) x dados de obra (DO)

Em comparação com os resultados obtidos para as EEs de A1-A5 com dados de obra (reais), as EEs obtidas com dados de projeto (orçamento) englobando os estágios A1-A4 foram 19,71% inferior, atingindo 336,33 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, dos quais 77,06% são referentes aos estágios de produto e 22,94% do estágio de transporte, cerca de 259,19 e 77,14 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> respectivamente, conforme **Figura 49**. Vale lembrar que o estágio de processos construtivos não foi contabilizado nos cálculos com dados de projeto.

Figura 49 - Percentual de participação de cada estágio no PAG total da edificação.

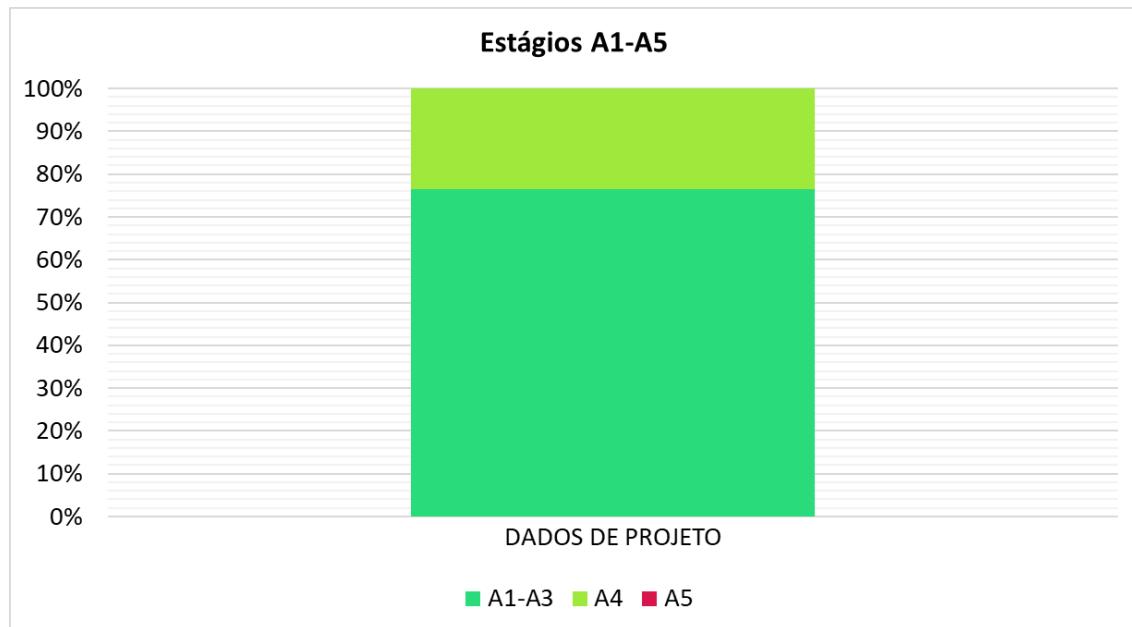
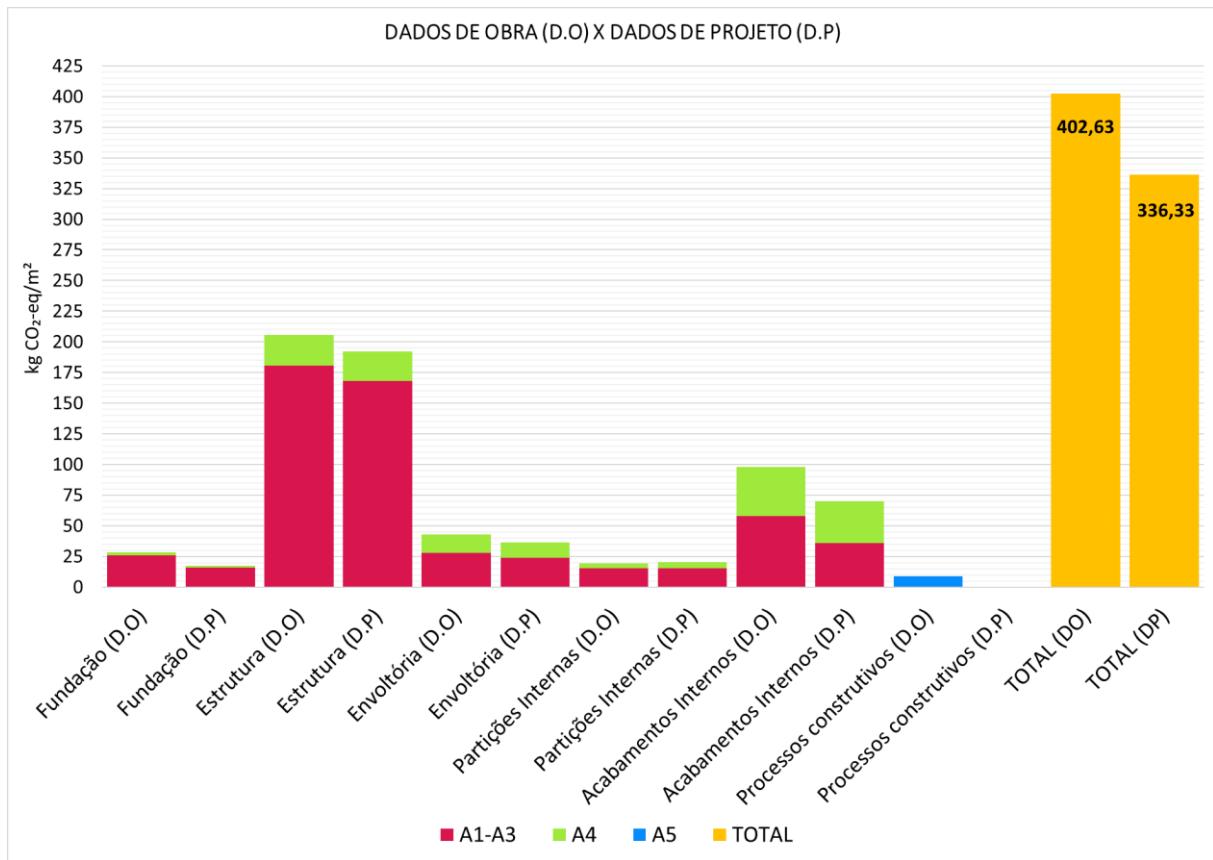


Figura 50 - Comparativo das EEs para dados de obra (DO) e dados de projeto (DP) por elemento e estágio analisado.



A maior variação encontrada entre os resultados obtidos de A1-A4 por metro quadrado de área construída foi para o elemento fundação. Como observado anteriormente, o material concreto sofreu grande variação em seu quantitativo no elemento fundação entre as fontes de dados, essa grande variação, resultou em uma diferença de 60,80% no resultado final das EEs por m<sup>2</sup>. O resultado obtido para fundação com dados de projeto foi de 17,55 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, valor esse inferior aos 28,22 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> resultantes dos dados de obra, conforme apresentado na **Figura 50**.

O elemento acabamentos internos também obteve diferenças consideráveis, com uma variação de 39,67%, atingindo cerca de 70,02 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> com dados de projeto, contra 97,80 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> com dados de obra. Essa grande variação se deu, principalmente, pelos resultados encontrados para o estágio de produto, que chegou a 35,92 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> com dados de projeto e 58,11 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> com dados de obra, um aumento de 61,8%. Já no estágio de transporte a diferença foi menor entre obra e projeto, cerca de 16,40%, sendo 34,10 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> para dados de projeto.

Para a envoltória a variação das EEs por m<sup>2</sup> foi cerca de 18,75%, onde o resultado obtido para as EEs com dados de projeto foi inferior as EEs de obra, saindo de 36,27 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> para 43,07 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, respectivamente. A estrutura, elemento de maior percentual de emissão para ambas as fontes de dados, sofreu uma variação bem mais baixa, cerca de 7,03%, sendo que o resultado com dados de projeto também foi inferior, alcançando 192,25 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>. As partições internas foi o elemento de menor variação percentual, apenas 6,08%, entretanto, foi o único elemento onde o resultado total das EEs por m<sup>2</sup> para dados de projeto foram superiores as EEs de obra, chegando a 20,24 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>.

Ao confrontar os resultados totais de obra (DO) e projeto (DP), é possível constatar que a realização de inventários baseados apenas em dados de projeto pode gerar resultados com grandes variações em relação à realidade.

Nesse estudo, o elemento fundação foi o que apresentou a maior variação, com uma diferença de 60,80%. Essa diferença reflete, em grande parte, as mudanças nos quantitativos de concreto utilizados. Além disso, o elemento acabamentos internos também apresentou uma variação considerável de 39,67%, especialmente em relação ao estágio de produto, que sofreu uma diferença de 61,8%. No caso da estrutura, embora a variação tenha sido mais baixa, em torno de 7,03%, os dados de obra também mostraram um valor superior ao dos dados de projeto.

Esses dados evidenciam que, ao se basear os inventários apenas em dados de projeto, pode-se não capturar as variações reais que ocorrem durante a construção, como mudanças de materiais, perdas durante o processo construtivo, adequações de projeto, simulações computacionais e imprevistos construtivos. Portanto, é importante considerar essas variáveis ao avaliar as emissões de uma edificação, para que os resultados sejam mais representativos da realidade.

Em relação aos estágios analisados, fica evidente que a fase de produção dos materiais representa a maior fonte de emissões embutidas de GEEs na edificação analisada. O concreto e o aço, amplamente utilizados na estrutura e fundação, foram os principais responsáveis pelo alto volume de emissões de carbono. Estratégias como a adoção de componentes pré-fabricados, a incorporação de materiais reciclados, a otimização do design estrutural para reduzir o consumo de insumos e a priorização de fornecedores locais podem contribuir para minimizar as emissões associadas ao ciclo de vida da edificação.

Ademais, a escolha de materiais para acabamentos internos e envoltória deve considerar não apenas fatores estéticos e funcionais, mas também suas emissões embutidas de GEEs, buscando alternativas de menor pegada de carbono.

## 4.2 ANÁLISE DE BENCHMARKING

O benchmarking, no contexto de emissões em edificações, refere-se ao estabelecimento de valores de referência que permitem avaliar e comparar o desempenho ambiental de construções ao longo de seu ciclo de vida. Esses valores são fundamentais para orientar práticas mais sustentáveis, identificando limites aceitáveis e metas desafiadoras para redução de impactos ambientais, como as emissões de gases de efeito estufa (GEEs). Em edificações residenciais, esses benchmarks oferecem um panorama essencial para alinhar projetos e políticas públicas às exigências de mitigação climática e usualmente utilizam a unidade de medida kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> para comparação de valores (IEA; EBC 2023).

A *Low Energy Transformation Initiative* (LETI) foi criada em 2017 e atua em políticas e regulamentações de carbono zero em todo o Reino Unido. As publicações feitas por LETI (2020), o *Climate Emergency Design Guide* e o *Embodied Carbon Primer*, afirmam que as emissões de carbono embutido precisam ser consideradas dentro dos orçamentos nacionais e

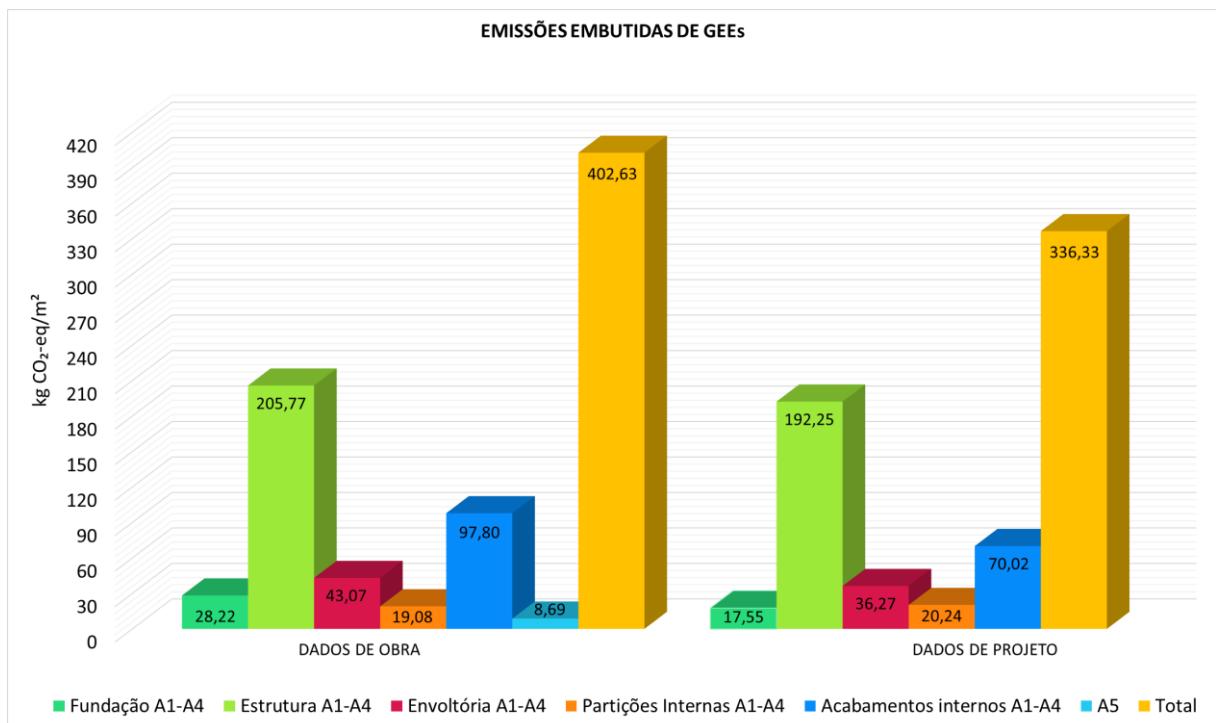
regionais de carbono. Isso significa que as emissões de carbono devem ser reduzidas, razão pela qual a LETI (2020b) estabeleceu metas para as emissões iniciais de carbono embutido (A1-A5), metas essas consideradas dentro do contexto de projeto e na realidade do Reino Unido.

Segundo LETI (2020a), o valor médio de emissões para edificações residenciais, considerando todos os estágios de carbono embutido (A1-A5 + B1-B5 + C1-C4) é 800 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>. O presente estudo não aborda o ciclo completo.

Contudo, os resultados obtidos para as emissões de carbono embutido nos estágios A1-A5 atingiram 402,63 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> com dados de obra (reais) e 336,33 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> com os dados de projeto (orçamento), uma variação de 19,71%. A **Figura 51** apresenta o resultado total das emissões de carbono, em kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, do edifício avaliado para os dados previstos e os utilizados.

Para os estágios de emissões embutidas de A1 a A4, LETI (2020a) chegou ao valor mínimo de 210 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> e máximo de 368 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, uma média de 275 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>. O valor total atingido com dados de projeto foi de 336,33 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, o que é inferior ao máximo estabelecido por LETI (2020a), entretanto 22,3% superior a média.

Figura 51 - Emissões de carbono, em kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, parciais e totais com os dados utilizados (obra) e os previstos (projeto).



LETI (2021), juntamente ao *Royal Institute of British Architects, UK Green Building Council*, o instituto *Structural Engineers* e a *Greater London Authority*, elaborou o *Embodied Carbon Target Alignment*, ainda dentro do contexto de projeto de edificações, para fornecer alinhamento na medição e comparação do carbono embutido.

As classificações propostas neste documento ajudam os projetistas a identificar se um projeto é melhor ou pior que o padrão convencional, sendo que um projeto médio alcança a classificação E, um bom projeto alcança a classificação C (meta LETI 2020) e a meta de projeto LETI 2030 é alcançar a classificação A. Vale ressaltar que a meta de LETI 2030 tem como objetivo uma redução de 65% em relação a linha de base. A **Figura 52** apresenta os valores para emissões de carbono embutidas iniciais (A1-A5) apresentada por LETI (2021).

Figura 52 - Sistema de rotulagem de carbono LETI 2030 e comparação com LETI 2020 para emissões embutidas iniciais (A1-A5).

<b>Upfront Embodied Carbon, A1-5 (exc. sequestration)</b>					
	<b>Band</b>	<b>Office</b>	<b>Residential (6+ storeys)</b>	<b>Education</b>	<b>Retail</b>
LETI 2030 Design Target	<b>A++</b>	<100	<100	<100	<100
	<b>A+</b>	<225	<200	<200	<200
	<b>A</b>	<350	<300	<300	<300
	<b>B</b>	<475	<400	<400	<425
	<b>C</b>	<600	<500	<500	<550
	<b>D</b>	<775	<675	<625	<700
	<b>E</b>	<950	<850	<750	<850
	<b>F</b>	<1100	<1000	<875	<1000
LETI 2020 Design Target	<b>G</b>	<1300	<1200	<1100	<1200

Fonte: LETI (2021)

Os dados apresentados mostram que para edifícios residenciais (*residential*) com valores de emissões inferiores a 100 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> são considerados excelentes (classificação A++), e para valores de emissões iguais ou superiores a 1200 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> os valores são considerados de alta emissão (classificação G).

A análise, utilizando os valores reais, permitiram acessar as emissões embutidas iniciais da edificação de forma completa, devido a inclusão no estágio de processos construtivos. Ao utilizar o sistema de rotulagem de LETI (2021), apresentado na **Figura 52**, para classificar a edificação, que obteve uma emissão de 402,63 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> (A1-A5), obteve-se o rótulo C, valor superior a 400 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>. O valor para as EEs totais com dados previstos (orçamento), 336,33 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> (A1-A4), se encaixa no rótulo B também. Ademais, vale lembrar que

essas EEs ainda poderiam aumentar caso fossem incluídos outros elementos da edificação no inventário da ACV.

Considerando uma variação de quase 20% entre os dados de emissões calculados com base no projeto e os valores reais obtidos na obra, observa-se um impacto significativo que essa diferença pode gerar nas classificações de desempenho em carbono. No caso específico da rotulagem pelo sistema LETI (2021), os dados estimados a partir do orçamento de projeto resultaram em uma classificação mais favorável (rótulo B), enquanto os dados reais aferidos durante a execução da obra rebaixaram a edificação para o rótulo C. Essa diferença evidencia como o uso exclusivo de dados projetados pode mascarar o desempenho real da construção, reforçando a importância de incorporar dados reais no inventário da ACV para uma avaliação mais precisa e fidedigna.

Frischknecht *et al.* (2020) analisaram uma edificação residencial de 12 pavimentos, empregando dados oriundos de 17 países nos estágios A1-A3, sendo que, no âmbito brasileiro, obtiveram aproximadamente 525 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>.

Na presente pesquisa, os resultados das EEs de A1-A3 atingiram 307,88 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> com dados utilizados (obra) e 259,19 com dados previstos (projeto). Ambos os valores estão abaixo da métrica sugerida por Frischknecht *et al.* (2020), entretanto é importante lembrar que a edificação aqui analisada é composta por 6 pavimentos, enquanto a edificação investigada pelos pesquisadores possuía 12 pavimentos.

Frischknecht *et al.* (2020) apresentaram também valores para os estágios A4-A5, onde a média brasileira atingiu 125 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, enquanto no presente estudo, os dados de obra apontam para um total de 94,75 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>. Os autores também apresentaram métricas para elementos específicos, como a fundação. Nesta pesquisa, a etapa de fundação alcançou 25,73 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> no estágio de produto em obra, enquanto os pesquisadores obtiveram 62,41 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>.

A pesquisa de Chen *et al.* (2022), que analisou uma edificação multifamiliar em Shangai, encontrou a média de 295,60 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> para as EEs iniciais de A1 a A5. Illankoon *et al.* (2023), que avaliaram os mesmos estágios do ciclo de vida, obtiveram o valor médio de 213 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> para edificações residenciais australianas e a média de 232,45 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> para edificações com estrutura de concreto e aço nos Estados Unidos.

Os resultados obtidos no presente estudo são superiores aos valores encontrados por Chen *et al.* (2022) e por Illankoon *et al.* (2023). O estudo de Chen *et al.* (2022) analisou menos

elementos da edificação, limitando-se a fundação, estrutura e paredes. Já Illankoon *et al.* (2023) limitaram-se a fundação, estrutura vertical e horizontal, portas, esquadrias e cobertura.

Röck *et al.* (2022) avaliaram as emissões em edificações residenciais em diversos países europeus, tendo obtido o valor médio de 340 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>. Dentro do escopo completo das emissões embutidas de carbono (A1-A5 + B1-B4 + C1-C4), o autor encontrou 356 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> na Dinamarca, 385 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> na União Europeia, 457 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> na Finlândia, 591 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> na Bélgica e 634 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> na França.

As EEs da obra avaliada foram de 402,63 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> (A1-A5), cerca de 18,42% acima do valor médio obtido por Röck *et al.* (2022), contudo se encontram dentro da faixa típica, de 250 a 600 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>, obtida na literatura para edifícios multifamiliares no cenário nacional.

Faria (2023) investigou edificações no mesmo bairro avaliado no presente estudo, na cidade de Brasília. O estudo da autora mostrou que as emissões referentes ao estágio de produto atingiram 265,22 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> para a edificação de 11.047,25 m<sup>2</sup> e 292,71 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> para a edificação de 15.824,25 m<sup>2</sup>, considerando uma vida útil de 50 anos. A autora destacou o concreto, o aço e o bloco de concreto como os materiais de maior participação nas emissões analisadas.

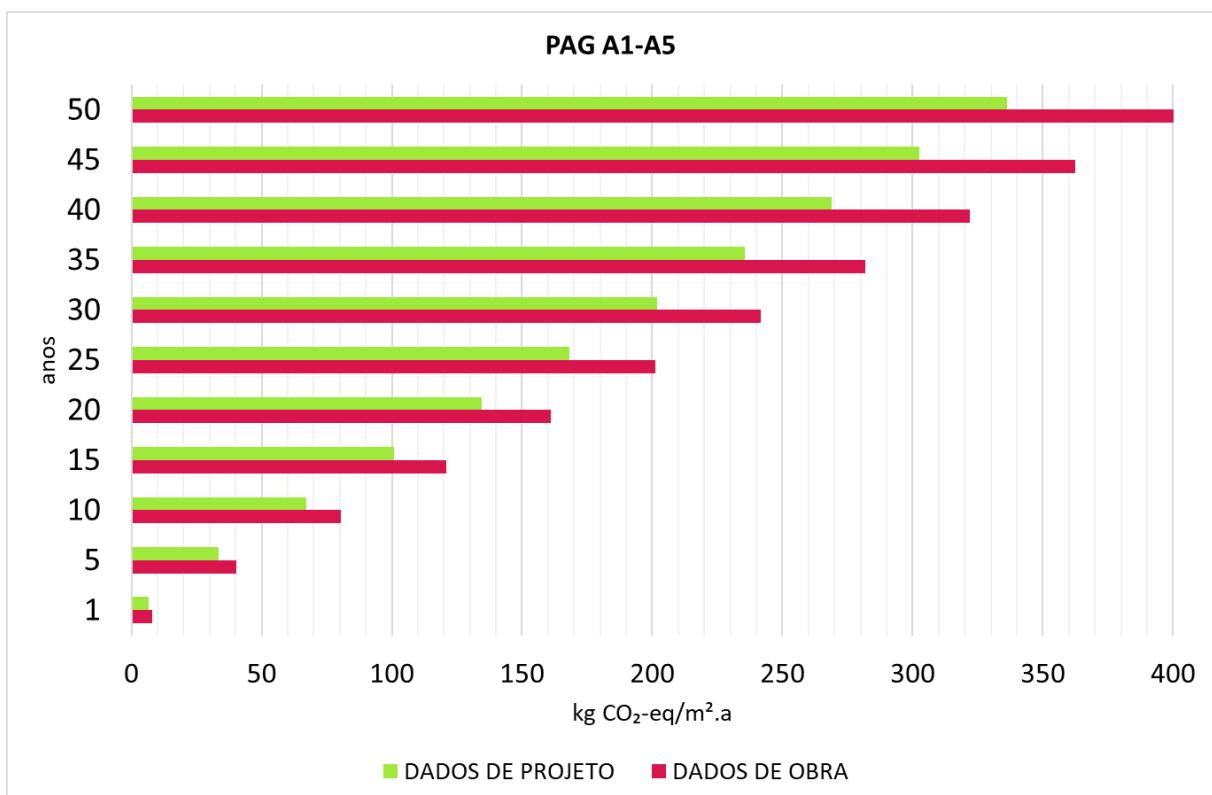
Ao comparar as EEs de obra de A1-A3 do presente estudo com os resultados obtidos por Faria (2023) para a edificação de 15.824,25 m<sup>2</sup>, observa-se que as emissões de obra aqui encontradas foram 5,18% superiores as da autora, atingindo 307,88 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>. Apesar da diferença de 11,41% entre as áreas das edificações analisadas, sendo a do presente estudo 14.203,67 m<sup>2</sup> e a da Faria (2023) 15.824,25 m<sup>2</sup>, as EEs de obra se apresentaram maiores do que as da autora devido ao maior número de elementos edilícios e materiais analisados nesta pesquisa. Já as EEs obtidas com dados de projeto foram 11,45% inferior ao resultado de 292,71 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> de Faria (2023), atingindo 259,19 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>.

Outro estudo de edificações brasileiras conduzido por Melo *et al.* (2023), também com escopo de A1-A3, obtiveram valores entre 270 e 390 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> para as EEs, sendo que a fundação não foi avaliada.

Essa disparidade observada na comparação entre as emissões embutidas de projeto e de obra com os resultados de outros estudos e benchmarkings revelam, de forma contundente, a influência decisiva da fonte de dados utilizada nos cálculos de emissões. Tal variação não é apenas um detalhe metodológico, mas um fator determinante que pode alterar significativamente a classificação de uma edificação em relação às suas emissões de GEEs.

Para avaliar as emissões embutidas de GEEs ao longo da vida útil da edificação, a **Figura 53** apresenta as EEs em kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>.ano ao longo dos 50 anos de vida considerados para a edificação em estudo. Para dados utilizados na prática, denominados de obra, o valor das EEs por metro quadrado de área construída por ano foi de 8,05 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>.a (A1-A5) e para dados previstos, denominados de projeto, as EEs totalizaram 6,73 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>.a (A1-A4), uma diferença percentual de aproximadamente 19,62%.

Figura 53 - Emissões embutidas de GEEs por ano com base nos dados previstos (de projeto) e dados utilizados (de obra).



O relatório *Benchmarking and target-setting for the life cycle-based environmental performance of buildings* (IEA e EBC, 2023), também apresenta diversas métricas de diferentes estudos de análises *top-down*, todas a fim de comparar os valores das emissões de carbono das edificações em kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>.a. Dentre essas métricas estão o SIA 2040 (Suiça), que sugere um valor  $\leq 11$  kgCO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>.a para edifícios residenciais de A1 a A5, o estudo de Pálenský e Lupíšek (2019), com 16,5 a 26,8 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>.a para vários tipos de edificações residenciais, e Hoxha *et al.* (2016) com variação de 11 a 20,3 kgCO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>.a para vários tipos de edificações.

Os autores Benke *et al.* (2024), no *Carbon Leadership Forum*, identificaram o valor de 6,6 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>.a para edificações residenciais multifamiliares, indo do estágio de produto ao estágio de transporte. O LETI (2020a, 2020b) apresentou o valor médio de 5,5 kg CO<sub>2</sub>-

eq/m<sup>2</sup>.a para os estágios A1-A3, e 0,52 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>.a para o estágio A4. Já Frischknecht *et al.* (2020) apresentaram o valor de 12,5 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>.a para edificações residenciais multifamiliares brasileiras, englobando toda a fase inicial de carbono embutido.

Segundo o estudo conduzido por Machado *et al.* (2025), que realizou uma análise estatística agregada de 72 estudos de casos entre Europa, Ásia, América do Norte e Oceania, com foco na estrutura das edificações, a média encontrada foi de 3,8 kgCO<sub>2</sub>eq./m<sup>2</sup>.a (A1-A3). Ao comparar com os resultados obtidos no presente estudo, o valor encontrado com dados de obra de A1-A5 é 107% superior ao de Machado *et al.* (2025). Mesmo que a comparação seja feita apenas para os estágios iniciais de A1-A3, o valor obtido com dados de obra neste estudo, 5,98 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>.a, ainda sim é 57,4% superior à média encontrada pelo autor.

Faria (2023) avaliou as emissões embutidas de A1-A3 de três tipologias com diferentes áreas de projeções e plantas no setor Noroeste em Brasília, o mesmo avaliado na presente pesquisa, tendo observado uma variação nas EEs de 5,30 kgCO<sub>2</sub>eq./m<sup>2</sup>.a a 5,85 kg CO<sub>2</sub>eq./m<sup>2</sup>.a, advindas dos edifícios residenciais da etapa 1 do Setor Noroeste-DF, considerando a vida útil de 50 anos.

Ao comparar os valores obtidos neste estudo, conforme **Figura 53**, as EEs de obra, 8,05 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>.a (A1-A5), apresentam um valor 36,65% abaixo do sugerido pelo SIA 2040 e 55,28% abaixo do proposto por Frischknecht *et al.* (2020), que apresentam mesmo escopo. Ambos os estudos englobam mais elementos da edificação do que os analisados por esta pesquisa, justificando assim os altos percentuais de diferença.

Em relação ao valor levantado por Benke *et al.* (2024) indo de A1-A4, as EEs de obra, que somaram 7,88 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>.a (A1-A4), superaram a média sugerida, ultrapassando 19,39%. Já as EEs de projeto, que atingiram 6,73 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>.a (A1-A4), mesmo que em pequena porcentagem, também ficaram acima da média sugerida pelos autores, com um valor cerca de 1,97% superior.

Já as emissões embutidas de obra referentes aos estágios A1–A3 neste estudo atingiram 6,16 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>.a em obra, ficando 12% acima do valor de referência estabelecido pelo benchmarking do LETI (2020a, 2020b), e pouco se diferenciam dos valores encontrados por Faria (2023), superando-os em 5,03%. Em contrapartida, as EEs de projeto para os estágios de produtos foram 5,82% inferiores ao benchmarking de LETI (2020a, 2020b) e 2,26% inferiores ao menor valor sugerido por Faria (2023), totalizando 5,18 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>.a, seguindo assim a tendência até aqui observada onde as EEs de projeto permanecem sempre abaixo dos valores em comparação.

Já para o estágio de transporte, as EEs de obra surpreenderam ao ultrapassar em mais de 230% a média sugerida por LETI (2020a, 2020b), alcançando 1,72 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>.a. As EEs de projeto, desta vez, seguiram em alta e ultrapassaram o valor de LETI (2020a, 2020b) cerca de 196%, chegando a 1,54 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>.a. A quantificação das emissões embutidas de GEEs referentes ao estágio de transporte, com base em dados empíricos obtidos diretamente no canteiro de obras, permitiu evidenciar de maneira substancial a contribuição desse estágio para o total das emissões iniciais de uma edificação. Os achados indicam que o transporte de materiais representa uma fração significativa das emissões associadas aos módulos A1–A5, ressaltando a importância de sua consideração criteriosa nas etapas de planejamento e avaliação ambiental de projetos construtivos.

Mesmo que as diferenças percentuais sejam relativamente pequenas em alguns casos, os resultados obtidos até o momento indicam que as emissões embutidas estimadas com a fase de projeto têm se mantido consistentemente abaixo dos valores de referência estabelecidos por benchmarks e pela literatura especializada.

Esse comportamento evidencia o potencial da etapa de projeto como instrumento estratégico para a mitigação das emissões iniciais. No entanto, reforça-se a importância da realização de ACVs alimentadas por inventários baseados no consumo efetivo de materiais registrado no canteiro de obras, a fim de se obter resultados mais representativos da realidade construtiva e, assim, aprimorar a compreensão das emissões embutidas associadas à edificação.

Para analisar as emissões embutidas de GEEs do estágio A1-A5 por habitante da edificação, foi estimado o cenário de ocupação do edifício avaliado, descrito no **Quadro 9**.

Quadro 9 - Cenário estimativo de ocupação da edificação em estudo.

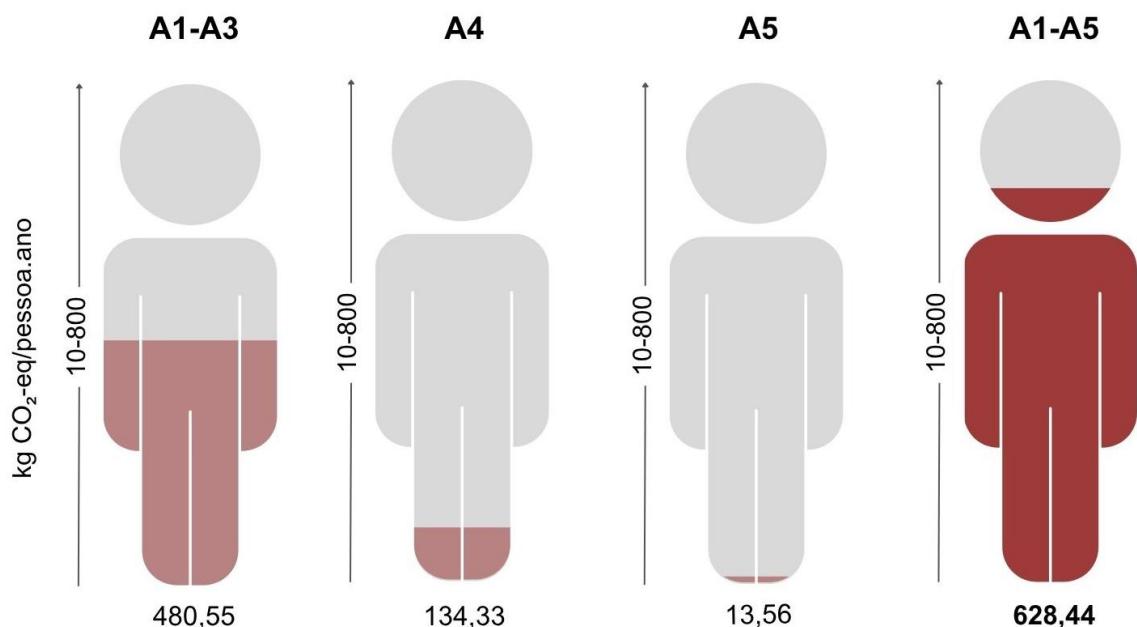
<b>Unidade</b>	<b>Número de unidades</b>	<b>Habitantes por unidade</b>
2 Quartos	48	3 habitantes
3 Quartos	30	5 habitantes
Cobertura	6	5 habitantes
<b>Total de habitantes</b>		<b>182 habitantes</b>

De acordo com o cenário determinado, a ocupação total da edificação será de 182 habitantes, sendo assim considerada uma área construída de 78,04 m<sup>2</sup>/pessoa. A **Figura 54** ilustra a distribuição das emissões embutidas por pessoa por ano para todos os 5 estágios do ciclo de vida analisado.

O estágio de produto (A1-A3) aparece com o maior valor de EEs por habitante, totalizando 480,55 kg CO<sub>2</sub>-eq/pessoa.ano, seguido pelo estágio de transporte com 134,33 kg

$\text{CO}_2\text{-eq/pessoa.ano}$  e o estágio de processos construtivos com 13,56  $\text{kg CO}_2\text{-eq/pessoa.ano}$ , o menor valor apresentado. Dentro do cenário proposto, as EEs totalizaram 628,44  $\text{kg CO}_2\text{-eq/pessoa.ano}$ , indo do estágio A1-A5 para dados de obra.

Figura 54 – Emissões embutidas de GEEs por pessoa por ano para cada estágio do ciclo de vida analisado



O **Quadro 10** apresenta um levantamento, feito através da literatura existente, de valores de referência das emissões embutidas de GEEs por pessoa por ano em diferentes contextos geográficos.

Quadro 10 - Valores de referência da literatura para emissões embutidas de GEEs por pessoa por ano.

Fonte	Localização	Tipologia	Estágios	$\text{kg CO}_2\text{eq/pessoa.ano}$
Röck <i>et al.</i> (2022)	Europa	Residencial multifamiliar	Ciclo completo de carbono embutido	640
Garnow <i>et al.</i> (2024)	Alemanha	Residencial multifamiliar	A1-A3, B4, B6, C3, C4.	676
Garnow <i>et al.</i> (2024)	Bélgica	Habitação mista	A1-A3, B4, B6, C3, C4.	676
Garnow <i>et al.</i> (2024)	Dinamarca	Residencial multifamiliar	A1-A3, B4, B6, C3, C4.	258
Benke <i>et al.</i> (2024) <i>Carbon Leadership Forum</i>	California	Residencial multifamiliar	A1-A5 (estrutura, envoltória e interiores)	373
Benke <i>et al.</i> (2025) <i>Carbon Leadership Forum</i>	Estados Unidos e Canada	Residencial multifamiliar	A1-A5 (fundação, estrutura, envoltória e interiores)	370

Röck *et al.* (2022) conduziram um estudo na Europa considerando o ciclo completo do carbono embutido e identificaram um valor de 640 kg CO<sub>2</sub>-eq/pessoa.ano para edificações residenciais multifamiliares. Por sua vez, Garnow *et al.* (2024), ao analisar as emissões relativas aos estágios A1–A3, B4, B6, C3 e C4 em 24 estudos de caso, encontrou uma variação entre 258 e 676 kg CO<sub>2</sub>-eq/pessoa.ano para esse mesmo tipo de edificação.

O valor obtido no presente estudo encontra-se dentro da faixa apresentada por Garnow *et al.* (2024), no entanto, não contempla todos os estágios de emissões embutidas. Esta análise limitou-se aos estágios A1–A5, excluindo os módulos B4, B6, C3 e C4 considerados pelo autor. Assim, é possível afirmar que, caso esses estágios fossem incluídos, o valor de emissões por pessoa por ano provavelmente ultrapassaria a média sugerida pelos autores.

O resultado obtido na presente pesquisa quando comparado com o estudo de Röck *et al.* (2022), pode ser considerado elevado pois considerou apenas os estágios A1–A5, uma vez que ficou apenas 1,85% abaixo do valor indicado pelos autores. Benke *et al.* (2024), no contexto da Califórnia (EUA), reportaram 373 kg CO<sub>2</sub>-eq/pessoa.ano considerando estrutura, envoltória e interiores, o que representa um valor 68,48% inferior ao encontrado nesta pesquisa.

Diante dessas comparações, evidencia-se que as emissões embutidas per capita da edificação analisada apresentam-se significativamente elevadas, mesmo quando considerados apenas os estágios iniciais do ciclo de vida (A1–A5). Isso reforça a importância de ampliar o escopo das análises de ACV para incluir também os estágios de uso e fim de vida (módulos B e C), proporcionando uma visão mais abrangente e precisa do impacto ambiental das edificações. Além disso, os resultados destacam a urgência de adotar estratégias mais eficientes de projeto e construção, bem como o uso de materiais de menor intensidade carbônica, como forma de mitigar as emissões no setor da construção civil.

#### **4.3 ANÁLISE GERAL DA EMISSÃO EMBUTIDAS DE CARBONO DA EDIFICAÇÃO AVALIADA**

A intensificação das mudanças climáticas e seus impactos globais tem reforçado a urgência de ações efetivas para a redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEEs), especialmente nos setores de maior pegada ambiental. A construção civil, como responsável por uma parcela expressiva dessas emissões, apresenta potencial significativo para mitigar seus impactos por meio de estratégias projetuais mais eficientes, uso racional de materiais e planejamento integrado ao longo do ciclo de vida das edificações. Nesse contexto, a Avaliação

do Ciclo de Vida (ACV) tem se consolidado como ferramenta fundamental para mensurar os impactos associados às diferentes etapas do processo construtivo e subsidiar a tomada de decisões rumo a uma construção de baixo carbono.

A aplicação da ACV na edificação multifamiliar de alto padrão analisada neste estudo permitiu identificar importantes discrepâncias entre os dados previstos e os valores reais utilizados na obra. Considerando as emissões totais associadas aos estágios A1 a A4, observou-se um aumento de 17,13% quando se compara os dados de projeto (4.777.120,93 kg CO<sub>2</sub>-eq) com os dados reais de obra (5.595.411,08 kg CO<sub>2</sub>-eq). Em termos de intensidade de emissão por área construída, as EEs saíram de 336,33 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> em projeto para 393,94 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> em obra. Ao incluir o estágio A5, quantificado apenas para dados de obra, as emissões por m<sup>2</sup> subiram para 402,63kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> (obra), uma diferença de 19,71% em relação ao valor de projeto. Tais resultados demonstrando a relevância da coleta de dados empíricos para a obtenção de resultados mais precisos, ademais, reforçam a necessidade de avaliações mais abrangentes, que incluem não só um maior número de materiais e elementos edilícios no inventário, mas também que englobe diversos estágios do ciclo de vida da edificação.

Dentre os elementos construtivos avaliados, a estrutura foi o principal responsável pelas emissões embutidas, refletindo o alto volume de materiais intensivos em carbono, como concreto e aço. Sua participação superou os demais elementos tanto em valores absolutos quanto em emissões por metro quadrado, mantendo-se como o maior impacto ambiental da edificação. Em seguida, os acabamentos internos apresentaram contribuições significativas, influenciadas pela diversidade de materiais utilizados e pelas longas distâncias envolvidas em sua cadeia de suprimentos, especialmente para itens como porcelanato, granito e gesso acartonado.

A fundação destacou-se por apresentar um aumento expressivo nas emissões, impulsionado por variações no volume de concreto efetivamente utilizado, decorrentes de condições geotécnicas específicas do terreno. Já a envoltória teve sua performance impactada principalmente pela substituição e intensificação do uso de materiais de alto impacto, como o granito, que assumiu papel de destaque nas emissões totais do elemento.

Por outro lado, as partições internas foram o elemento com menor contribuição relativa para as emissões totais da edificação. Ainda que tenham apresentado mudanças significativas no orçamento, como a ausência de materiais relevantes, os dados reais mostraram um impacto ambiental inferior quando comparado aos demais elementos analisados.

De forma geral, os resultados obtidos neste estudo reforçam a importância da coleta e análise de dados reais para uma avaliação mais confiável das emissões de carbono embutidas nas edificações. A escassez de análises com esse grau de detalhamento evidencia a necessidade urgente de ampliar e disseminar avaliações baseadas em dados primários, que considerem as especificidades construtivas e logísticas do contexto brasileiro. Estudos como este não apenas contribuem para o avanço científico da área, mas também oferecem subsídios técnicos fundamentais para o aprimoramento de práticas projetuais e estratégias de mitigação alinhadas à realidade da construção no país.

#### **4.3.1 Emissões relacionadas aos materiais (A1-A3)**

Em um panorama geral dos resultados obtidos neste estudo, nos estágios A1-A3, correspondentes à extração, transporte até a indústria e fabricação dos materiais, a edificação em estudo apresentou uma emissão total de 4.373.029,69 kg CO<sub>2</sub>-eq com dados de obra, superando os 3.681.381,25 kg CO<sub>2</sub>-eq estimados a partir do projeto, o que representa um acréscimo de 18,79%.

O elemento estrutura foi responsável pela maior parcela dessas emissões, totalizando 2.566.257,56 kg CO<sub>2</sub>-eq em obra (58,68% do total de A1-A3), impulsionado principalmente pelo alto consumo de concreto (66,69% das emissões desse elemento). A fundação registrou um aumento de 61,81% nas emissões, saltando de 225.858,72 para 365.455,28 kg CO<sub>2</sub>-eq, reflexo direto da adoção de sapatas escavadas e da dureza do solo.

Nos acabamentos internos, as emissões aumentaram de 510.204,28 para 825.422,34 kg CO<sub>2</sub>-eq (aproximadamente 62% de crescimento). O porcelanato, empregado no piso e paredes, destacou-se como o maior emissor dentro deste grupo (30,23% das emissões), seguido por tintas acrílicas (19,34%), parede e teto, e granito (14,06%), piso, parede e bancadas. A substituição de materiais inicialmente previstos, bem como a inclusão de itens não contemplados no projeto, impactaram significativamente nos resultados.

No elemento envoltória, o uso de granito substituindo outros revestimentos resultou em um aumento de 18,11% nas emissões, passando de 229.263,18 para 270.784,24 kg CO<sub>2</sub>-eq. O granito tornou-se o principal responsável pelas emissões embutidas da envoltória com 47,31% de contribuição nas emissões. O alumínio, empregado nas esquadrias, também se destacou sendo responsável por mais de 26% das emissões da envoltória em obra, atingindo 104.965,81 kg CO<sub>2</sub>-eq.

As partições internas, embora tenham apresentado menor variação global, revelaram falhas significativas no orçamento de projeto: materiais como bloco de concreto e chapisco estavam ausentes no planejamento, mas representaram 28,42% e 3,12% das emissões reais do elemento, respectivamente.

As emissões embutidas de carbono dos materiais utilizados na construção do edifício apresentam uma durabilidade compatível com uma vida útil de 50 anos. Concreto e aço são os que apresentam maiores emissões, no início da vida útil do edifício, bem como o granito. A partir do levantamento do consumo energético das fases avaliadas, a **Tabela 13** apresenta os resultados da emissão de carbono (medida em kg CO<sub>2</sub>eq) baseado nos dados utilizados na construção do edifício.

Tabela 13 - Emissões embutidas de GEEs da edificação analisada.

<b>Material</b>	<b>Emissão CO<sub>2</sub></b>	<b>%</b>	<b>Emissão CO<sub>2</sub></b>	<b>%</b>
	Kg CO <sub>2</sub> eq/ano	(1 ano)	kg CO <sub>2</sub> eq/50anos	(50 anos)
Aço	17.378,71	20,68	869.935,60	15,07
Alumínio	2,53	0,003	158,13	0,003
Argamassa	3.994,73	4,75	199.763,72	3,46
Bloco cerâmico cerâmico	2.379,74	2,83	297.468,02	5,15
Bloco de concreto	1.334,89	1,59	166.860,87	2,89
Brita	1.000,74	1,19	50.036,97	0,87
Chapisco	136,53	0,16	6.826,35	0,12
Cimento	815,52	0,97	40.776,19	0,71
Concreto	40.232,55	47,87	2.011.627,50	34,83
Contrapiso	306,68	0,36	25.607,78	0,44
Esmalte	60,06	0,07	18.769,98	0,32
Granito	6.079,17	7,23	303.958,38	5,26
Madeira aplainada	22,26	0,03	1.112,78	0,02
Massa PVA	622,78	0,74	194.619,81	3,37
Porcelanato	4.989,94	5,94	416.659,95	7,21
Rejunte	26,63	0,03	2.223,44	0,03
Revestimento cerâmico	46,57	0,006	3.888,99	0,07
Tinta acrílica	3.192,65	3,80	997.704,00	17,27
Tinta látex-acrílica	314,92	0,37	98.413,13	1,70
Vidro	1.099,21	1,31	68.700,38	1,19
<b>Total</b>		<b>100%</b>		<b>100%</b>

Para obter o total da emissão de carbono incorporado, considerando uma vida útil de 50 anos, foi estimado o fator de reposição dos materiais e componentes para cada sistema do

edifício utilizando os valores propostos por Caldas e Spoto (2016), apresentados na **Figura 55.**

Figura 55 - Determinação da vida útil de projeto (VUP) e fator de reposição.

Sistemas da Edificação	VUP (Fonte)	Fator de Reposição
Estrutura	50 ABNT NBR 15575-1 (4)	1,00
Vedaçāo vertical externa	40 ABNT NBR 15575-1 (4)	1,25
Vedaçāo vertical interna <sup>1</sup>	30 Palacio (14)	2,50
Pintura externa	12 Tavares (19)	4,17
Pintura interna	8 Tavares (19)	6,25
Estrutura cobertura	30 Tavares (19)	1,67
Telhas	20 ABNT NBR 15575-1 (4)	2,50
Pisos internos	30 Tavares (19)	1,67
Esquadrias externas	40 Paulsen e Spoto (20)	1,25
Esquadrias internas	40 Paulsen e Spoto (20)	1,25
Hidrossanitário <sup>2</sup>	45 Tavares (19)	1,11

Fonte: Caldas e Spoto (2016)

As emissões são geradas em cada etapa do processo de produção dos materiais de construção, sendo o setor da construção civil responsável por extrair de 14% a 50% dos recursos naturais da natureza a nível mundial (Sjöström, 1996, apud Grigoletti, 2001). Materiais como o piso porcelanato e a pintura acrílica demandam energia de manutenção, por exemplo, cujos valores estão associados ao fator de reposição e vida útil de projeto (VUP), correspondendo ao mínimo obrigatório, sugerida pelo guia da ASBEA, baseado nos dados da ABNT NBR 15575-1. Assim, ao longo dos 50 anos de vida útil, haverá aproximadamente 4 trocas de piso e 6 repinturas externas. A durabilidade e vida útil dos materiais estão relacionados com a necessidade de reposição, levando em consideração as medidas previstas na NBR 15575.

#### 4.3.2 Emissões relacionadas ao transporte de materiais (A4)

No estágio A4, referente ao transporte dos materiais até o canteiro de obras, as emissões totais passaram de 1.095.739,68 kg CO<sub>2</sub>-eq (projeto) para 1.222.381,39 kg CO<sub>2</sub>-eq (obra), um crescimento de aproximadamente 11,56%. Analisando por m<sup>2</sup> de área construída, os valores variaram de 77,14 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, em projeto, para 86,06 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> em obra. Esse aumento

reflete não apenas o maior volume de materiais utilizados, mas também o acréscimo de distâncias de transporte identificadas apenas com o uso das notas fiscais reais.

O elemento acabamentos internos foi o maior responsável pelas emissões do estágio A4, totalizando 563.732,80 kg CO<sub>2</sub>-eq em obra, o que corresponde a 46,12% do total de emissões dessa etapa. Os principais contribuintes foram o porcelanato e os revestimentos cerâmicos, que, apesar de representarem apenas 23,35% do peso dos materiais, alcançaram 61,68% das emissões do grupo devido à longa distância de transporte.

A estrutura manteve uma alta contribuição com 356.446,74 kg CO<sub>2</sub>-eq com dados de obra, sendo o aço o principal emissor (53,95%). Na envoltória, as emissões aumentaram 17,93%, atribuídas especialmente ao transporte de granito e alumínio — este último com a maior distância percorrida entre fabricante e fornecedor.

O elemento partições internas foi o único que apresentou redução nas emissões de transporte, passando de 70.337,34 para 52.242,60 kg CO<sub>2</sub>-eq, em função da menor quantidade de blocos cerâmicos efetivamente utilizados e da otimização logística.

#### **4.3.3 Emissões relacionadas aos processos construtivos (A5)**

O estágio A5, que compreende as emissões associadas aos processos construtivos propriamente ditos — como o uso de equipamentos, consumo de energia e transporte de resíduos — totalizaram 123.411,78 kg CO<sub>2</sub>-eq com base nos dados reais coletados no canteiro de obras. Este valor corresponde a 2,21% das emissões totais da edificação nos estágios A1 a A5, representando uma intensidade de emissão de 8,69 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>.

A maior parcela dessas emissões está relacionada ao consumo de diesel, que respondeu por 57,25% do total do A5. Este resultado evidencia a forte dependência de combustíveis fósseis nas práticas construtivas convencionais, em especial na movimentação de terra, içamento de cargas e operação de equipamentos. A eletricidade foi o segundo maior contribuinte, com 19,59%, seguida pelo transporte de resíduos, que representou 19,02% das emissões do estágio.

Embora o A5 apresente menor participação relativa em comparação aos estágios de produção e transporte, seu impacto não deve ser negligenciado. A execução da obra é uma etapa operacional crítica, sujeita a variabilidades e ineficiências que podem amplificar as emissões caso não haja controle adequado. Estratégias como a eletrificação de equipamentos, o uso de fontes renováveis de energia no canteiro, a redução de perdas e a otimização logística de resíduos podem contribuir significativamente para a redução das emissões desse estágio.

A quantificação das emissões no A5 com base em dados empíricos é especialmente relevante no contexto brasileiro, onde poucos estudos trazem essa etapa com o nível de detalhamento apresentado neste trabalho. A inclusão dessa fase amplia a compreensão sobre a pegada de carbono real das edificações e fortalece a necessidade de abordagens integradas entre projeto, execução e operação para a promoção de construções mais sustentáveis.

#### **4.3.4 Analise geral**

A avaliação das emissões embutidas de carbono nos estágios A1 a A5 da edificação analisada permitiu compreender de forma abrangente o impacto ambiental associado à sua construção. Os resultados obtidos revelam que a estrutura foi o principal vetor de emissões, seguida pelos acabamentos internos e pela fundação — todos fortemente influenciados pelo uso intensivo de materiais como concreto, aço e granito. Por outro lado, as partições internas, embora menos impactantes em termos absolutos, evidenciaram alterações significativas no orçamento prévio de projeto, reforçando a necessidade de considerar o maior número possível de materiais nos inventários, mesmo aqueles aparentemente secundários.

A indústria da construção é responsável por aproximadamente 38% das emissões globais de GEE relacionadas à energia (Zhou *et al.*, 2023), o que reforça a urgência de mitigar seus impactos. Os resultados desta dissertação evidenciam a relevância da Avaliação do Ciclo de Vida aplicada à fase construtiva, demonstrando como as decisões relacionadas a sistemas e materiais construtivos impactam diretamente a pegada de carbono da edificação. A obtenção de dados diretamente na fase construtiva permitiu uma avaliação mais precisa da realidade construtiva, contribuindo para a identificação de oportunidades de redução dos impactos ambientais e superando as limitações de análises baseadas exclusivamente em estimativas orçamentárias.

Destaca-se, ainda, a importância de incluir nas análises elementos muitas vezes negligenciados em estudos anteriores, como fundação e acabamentos internos. A exclusão recorrente desses componentes se deve, em grande parte, à dificuldade de obtenção de dados confiáveis, especialmente em estudos com base em projetos ou inventários genéricos. No entanto, os resultados demonstram que esses elementos podem representar parcelas significativas das emissões totais, especialmente quando há variações de projeto durante a execução da obra ou uso de materiais de alto impacto. Sua inclusão amplia a representatividade dos resultados e confere maior robustez às análises ambientais.

A inclusão do estágio A5, frequentemente negligenciado em estudos nacionais, também se mostrou relevante ao contabilizar as emissões associadas ao consumo de diesel, eletricidade e transporte de resíduos. Embora sua participação percentual nas emissões totais seja menor, os resultados indicam que práticas operacionais inadequadas podem amplificar significativamente seu impacto. Estratégias como racionalização do canteiro, uso de fontes alternativas de energia e gestão eficiente de resíduos pode contribuir para mitigar esse efeito.

Outro ponto de destaque é a predominância da construção em concreto, amplamente adotada no Brasil, que acarreta emissões expressivas de dióxido de carbono. Contudo, essa realidade deve ser compreendida dentro do contexto de um país em desenvolvimento, com elevado déficit habitacional e forte crescimento urbano. Além disso, Brasília possui forte tendência, desde sua origem, por moradias verticalizadas, que contribui para a escolha de sistemas estruturais em concreto.

Em síntese, este estudo contribui para preencher uma lacuna relevante na literatura nacional ao aplicar a ACV com base em dados reais a uma edificação residencial multifamiliar de alto padrão brasileira — tipologia ainda pouco contemplada nas pesquisas sobre construção de baixo carbono. A abordagem adotada fornece subsídios técnicos e metodológicos para o aprimoramento de políticas públicas, normativas e práticas projetuais voltadas à sustentabilidade, além de corroborar na formação de um benchmarking brasileiro e guiar metas para alcançar edificações de baixo carbono no brasil.

Evidencia-se, portanto, a urgência de ampliar, qualificar e institucionalizar avaliações ambientais que se apoiem em dados empíricos concretos, capazes de capturar as especificidades da realidade construtiva brasileira e de subsidiar, com maior precisão, a formulação de estratégias eficazes para a mitigação das emissões no setor. A consolidação de uma cultura avaliativa comprometida com a completude e a fidedignidade dos inventários torna-se imperativa diante da complexidade e dos desafios que envolvem a transição para uma construção civil de baixo carbono. Nesse cenário, ganha centralidade a necessidade de se promoverem avaliações do ciclo de vida cada vez mais abrangentes e rigorosas, que considerem não apenas a diversidade dos elementos edilícios envolvidos, muitas vezes negligenciados por limitações de dados, mas também a totalidade ou o maior número possível dos estágios do ciclo de vida das edificações. Apenas com diagnósticos ambientalmente fundamentados, representativos e contextualizados será possível avançar rumo a um modelo construtivo mais sustentável, tecnicamente embasado e alinhado aos compromissos climáticos nacionais e internacionais.

## CAPÍTULO V

Conclusões finais

## 5 CONCLUSÕES

Diante do contexto das mudanças climáticas e da necessidade de mitigar as emissões de gases de efeito estufa (GEEs) na construção civil, este estudo teve como objetivo quantificar as emissões embutidas (EEs) de carbono em uma edificação residencial multifamiliar de alto padrão, situada no Setor Noroeste, em Brasília. A abordagem metodológica adotada baseou-se na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), considerando os estágios de produção (A1-A3), transporte (A4) e processos construtivos (A5), e comparando os dados estimados de projeto com os dados reais de obra.

Os resultados revelaram variações expressivas entre os quantitativos orçados e executados, com impacto direto nas emissões. O concreto da fundação apresentou aumento de 54% no consumo, refletindo um acréscimo de 61,79% nas EEs desse elemento. Os acabamentos internos também registraram elevação relevante, com aumento de 126% na massa PVA e 95,5% na tinta acrílica. No total, as EEs com base nos dados de obra atingiram 5.718.822,86 kg CO<sub>2</sub>-eq, um valor 19,72% superior ao previsto no projeto.

Quando normalizadas por metro quadrado, as EEs (A1-A5) passaram de 336,33 para 402,63 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>, evidenciando a subestimação dos orçamentos prévios. As principais fontes de emissão foram o estágio de produção dos materiais (76,47%), seguido pelo transporte (21,37%) e pelos processos construtivos (2,16%), percentuais esses referentes aos resultados obtidos com dados de obra.

Dentre os elementos edilícios, a estrutura foi o maior emissor no estágio A1-A3, respondendo por 58,68% das EEs, seguida pelos acabamentos internos (18,88%) e pela envoltória (9,08%). No transporte (A4), os acabamentos lideraram com 46,12%, reflexo da longa distância de fornecedores (acima de 1.600 km). O consumo de diesel foi responsável por 57,25% das emissões do estágio A5, demonstrando o peso do combustível fóssil na etapa de execução.

O concreto da estrutura destacou-se como o principal material emissor, representando 37,67% das EEs totais por material de A1-A3, seguido pelo aço da estrutura (18,46%), o concreto da fundação (6,87%), o revestimento cerâmico e porcelanato (4,53%), o granito da envoltória (4,30%) e o alumínio das esquadrias, brises e requadros da envoltória (2,89%).

Quando as emissões por material são analisadas no estágio A4 há uma variação dentre os materiais de maior emissão. No estágio de transporte, o maior emissor foram os revestimentos cerâmicos e porcelanatos responsáveis por 28,45%, seguido pelo aço da estrutura

(15,73%), o alumínio das esquadrias, brises e requadros da envoltória (8,08%), o granito da envoltória (7,59%), a brita da estrutura (6,80%) e o concreto empregado na estrutura (6,61%).

As variações entre projeto e obra foram significativas: a fundação apresentou aumento de 60,8% nas emissões, os acabamentos internos cresceram 39,67%, enquanto a estrutura teve acréscimo de 7,03%. Essas diferenças reforçam a importância de se utilizar dados reais na avaliação ambiental de edificações, sobretudo em elementos críticos à precisão dos inventários.

No benchmarking internacional a edificação, que atingiu 402,63 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> (A1-A5), obteve valor compatível com padrões globais, porém 0,66% acima da faixa intermediária da classificação de rotulagem LETI (rótulo C). Em emissões anuais, obteve 8,05 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>.a — 36,65% abaixo da meta do SIA 2040. Entretanto, as emissões de transporte (A4) foram 230% superiores à meta do LETI, evidenciando a necessidade de otimização logística. Por habitante, as emissões foram de 628,44 kg CO<sub>2</sub>-eq/pessoa.ano, valor próximo do limite superior estabelecido em estudos internacionais que possuem um escopo maior do que o do presente estudo, abrangendo todos os estágios de carbono embutido.

Conclui-se que a adoção de dados empíricos no processo de avaliação ambiental é essencial para diagnósticos mais precisos e representativos. A discrepância entre os dados estimados e os reais evidencia a influência de decisões operacionais — como a escolha de materiais e sua logística — no desempenho ambiental final da edificação. Considerando que a fase de produção dos materiais (A1-A3) foi responsável pela maior parcela das emissões (76,47%), torna-se prioritária a seleção criteriosa de materiais com menor pegada de carbono já nas etapas iniciais do projeto. Nesse contexto, estratégias de mitigação devem ser implementadas desde as fases iniciais do projeto e continuamente ajustadas conforme a execução. Priorizar fornecedores locais, adotar sistemas construtivos de baixa emissão e substituir combustíveis fósseis por fontes renováveis são caminhos indispensáveis para a descarbonização do setor.

Como continuidade desta pesquisa, recomenda-se a ampliação da amostra para diferentes tipologias e regiões do Brasil, além da inclusão dos módulos de uso (B) e fim de vida (C) na ACV, bem como demais elementos da edificação. A integração de outras categorias de impacto ambiental e dimensões socioeconômicas também se mostra relevante para uma avaliação mais abrangente e alinhada às políticas públicas e ao planejamento urbano sustentável.

## Referências Bibliográficas

- ADAMS, Matthew; BURROWS, Victoria; RICHARDSON, Stephen; DRINKWATER, James; GAMBOA, Cristina. **Bringing Embodied Carbon Upfront: Coordinated Action for the Building and Construction Sector to Tackle Embodied Carbon.** [S.l.]: World Green Building Council – WorldGBC, set. 2019. Disponível em: [https://worldgbc.s3.eu-west-2.amazonaws.com/wp-content/uploads/2022/09/22123951/WorldGBC\\_Bringing\\_Embodied\\_Carbon\\_Upfront.pdf](https://worldgbc.s3.eu-west-2.amazonaws.com/wp-content/uploads/2022/09/22123951/WorldGBC_Bringing_Embodied_Carbon_Upfront.pdf).
- ALIAUX, Nicolas; SAADE, Marcella Ruschi mendes; HOXHA, Endrit; TRUGER, Barbara. Future trends in materials manufacturing for low carbon building stocks: A prospective macro-scale analysis at the provincial level. **Journal of Cleaner Production**, v. 382, n. 135278, 1 jan. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135278>.
- ALOTAIBI, Badr Saad; KHAN, Sahil Ali; ABUHUSAIN, Mohammed Awad; AL-TAMIMI, Nedhal; ELNAKLAH, Rana; KAMAL, Mohammad Arif. Life Cycle Assessment of Embodied Carbon and Strategies for Decarbonization of a High-Rise Residential Building. **Buildings**, v. 12, n. 8, art. 1203, 1 ago. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings12081203>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **ABNT NBR ISO 14044: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações.** Rio de Janeiro : ABNT, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040:2009: gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Princípios e estrutura.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 11 p. Publicada em 15/12/2009. Errata publicada em 21/07/2014.
- AZARI, Rahman; GARSHASBI, Samira; AMINI, Pegah; RASHED-ALI, Hazem; MOHAMMADI, Yousef. Multi-objective optimization of building envelope design for life cycle environmental performance. **Energy and Buildings**, v. 126, p. 524–534, 15 ago. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.054>.
- BAHRAMIAN, Majid; YETILMEZSOY, Kaan. Life cycle assessment of the building industry: An overview of two decades of research (1995–2018). **Energy and Buildings**, v.219, n. 109917, 15 jul. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109917>.
- BENKE, Brad; JENSEN, Aurora; CHAFART, Manuel; SIMONEN, Kathrina; LEWIS, Meghan. **The embodied carbon benchmark report: embodied carbon budgets and analysis of 292 buildings in the US and Canada.** Seattle: Carbon Leadership Forum, 2025.

BENKE, Brad; ROBERTS, Matt; SHEN, Yang; CARLISLE, Steph; CHAFART, Mel; SIMONEN, Kate. *The California Carbon Report: An Analysis of the Embodied and Operational Carbon Impacts of 30 Buildings*. Seattle: Carbon Leadership Forum, University of Washington, 2024. Disponível em: <https://carbonleadershipforum.org/clf-wblca-v2/>. Acesso em: 29 abr. 2025.

**BETTINI COMUNICAÇÃO. Brasil produz 48 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição.** São Paulo: Movimento Circular, 18 jan. 2024. Disponível em: <https://movimentocircular.io/pt/blog/brasil-produz-48-milhoes-de-toneladas-de-residuos-de-construcao-e-demolicao>. Acesso em: 2 fev. 2024.

BIANCHI, Pllyanna Fernandes; YEPES, Victor; VITORIO JR., Paulo Cesar; KRIPKA, Moacir. Study of alternatives for the design of sustainable low-income housing in Brazil. **Sustainability**, v. 13, n. 9, 1 maio 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13094757>.

BRASIL. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 15575-1:2021: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://normadedesempenho.com.br/nbr-15-575-1-2021/>. Acesso em: 30 dez. 2024.

BRASIL. **Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009**. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 30 dez. 2009. Disponível em:  
[https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop\\_mostrarIntegra?codteor=841507&filename=Legislac](https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarIntegra?codteor=841507&filename=Legislac).

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil: 6ª edição – 2022**. Brasília, DF: MCTI, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes>.

BRASIL. Mínistério do Desenvolvimento, Indústria, comércio e serviços. **MDIC começa a elaborar plano para descarbonizar setores industriais**. Brasília, 11 maio 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2024/maio/mdic-comeca-a-elaborar-plano-para-descarbonizar-setores-industriais>. Acesso em: 21 maio 2024.

**BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI).** *BS EN 15978:2011: Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method*. London: BSI, 2011.

BRUGNERA, Rosilene Regolão. **Análise integrada de desempenho energético, impacto ambiental e custo:** estudo de soluções de fachada para edifícios de escritórios no Brasil. 2018. Tese (Doutorado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/102/102131/tde-31082018-154505/pt-br.php>.

BURROWS, Victoria Kate; BLACK, Matthew. **WorldGBC Net Zero Carbon Buildings Commitment: Introduction – Businesses & Organisations.** [S.l.]: World Green Building Council, set. 2021. Disponível em: <https://worldgbc.org/wp-content/uploads/2023/03/WorldGBC-NZCBCmt Intro 2021 hs-1.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2023.

BUYLE, Matthias; BRAET, Johan; AUDENAERT, Amaryllis. Life cycle assessment in the construction sector: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 26, p.379-388, out. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.001>.

CABEZA, L. F. *et al.* Buildings. Em: **IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2022. p. 953–1048.

CALDAS, Locas Rosse; SARAIVA, Anna Bernstad; ANDREOLA, Vanessa Maria; FILHO, Romildo Dias Toledo. Bamboo bio-concrete as an alternative for buildings' climate change mitigation and adaptation. **Construction and Building Materials** [S.l.], v. 263, 10 dez. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120652>.

CALDAS, Lucas; PEDROSO, Gilson; SPOSTO, Rosa Maria. **Avaliação do ciclo de vida energético (ACVE) de uma habitação. Estudo para diferentes cenários considerando as etapas do berço ao túmulo.** Vitruvius. Anais. São Paulo: abr. 2016. Disponível em: <<https://vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/16.191/6012>>. Acesso em: 7 maio. 2024

**CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC).** *Construção cresce 3,5% no 2º trimestre de 2024, superando expectativas econômicas.* Brasília: CBIC, 3 set. 2024. Disponível em: <https://cbic.org.br/construcao-cresce-35-no-2o-trimestre-de-2024-superando-expectativas-economicas/>. Acesso em: 13 set. 2024.

**CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC).** *Panorama geral da construção civil no Brasil.* Brasília: CBIC, nov. 2022. Disponível em: <https://cbic.org.br/wp-content/uploads/2022/11/panorama-construcao-nov-2022-3.pdf>. Acesso em: 1 dez. 2023.

CARCASSI, Olga Beatrice; HABERT, Guillaume; MALIGHETTI, Laura Elisabetta; PITTAU, Francesco. Material Diets for Climate-Neutral Construction. **Environmental Science and Technology**, v. 56, n. 8, p. 5213–5223, 19 abr. 2022. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.1c05895>.

CARVALHO, José Pedro; VILLASCHI, Fernanda Schmid; BRAGANÇA, Luís. Assessing life cycle environmental and economic impacts of building construction solutions with BIM. **Sustainability**, v. 13, n. 8914, 2 ago. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/16/8914>.

CHAN, Melissa; MASROM, Md. Asrul Nasid; YASIN, Suleiman. Selection of Low-Carbon Building Materials in Construction Projects: Construction Professionals' Perspectives. **Buildings**, v. 12, n. 486, 14 abr. 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-5309/12/4/486>.

CHASTAS, Panagiotis; THEODOSIOU, Theodoros; KONTOLEON, Karolos J.; BIKAS, Dimitrios. Normalising and assessing carbon emissions in the building sector: A review on the embodied CO<sub>2</sub> emissions of residential buildings. **Building and Environment**, v. 130, p. 212-226, 15 fev. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.032>.

CHEN, Yantai; LUO, Haibei; CHEN, Jin; GUO, Yanlin. Building data-driven dynamic capabilities to arrest knowledge hiding: A knowledge management perspective. **Journal of Business Research**, v. 139, p. 1138–1154, 1 fev. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.10.050>.

COSTA, Simone de Fátima Campos; KOS, Darja. Aplicação da Metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida Energético a uma Residência em Belém-PA. **Paranoá 30: Cadernos de Arquitetura e urbanismo**, n. 30, 5 abr. 2021. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/paranoa/article/view/34889/29619>.

CRIPPA, M.; GUZZARDI, D.; PAGANI, F.; BANJA, M.; MUNTEAN, M.; SCHAAF, E.; BECKER, W.; MONFORTI-FERRARIO, F.; QUADRELLI, R.; RISQUEZ MARTIN, A.; TAGHAVI-MOHARAMLI, P.; KÖYKKÄ, J.; GRASSI, G.; ROSSI, S.; BRANDAO DE MELO, J.; OOM, D.; BRANCO, A.; SAN-MIGUEL, J.; VIGNATI, E. **GHG emissions of all**

**world countries.** Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2023. (JRC Science for Policy Report, JRC134504). DOI: 10.2760/953322.

DANI, Aflah Alamsah; ROY, Krishanu; MASOOD, Rehan; FANG, Zhiyuan; LIM, James B. P.. A Comparative Study on the Life Cycle Assessment of New Zealand Residential Buildings. **Buildings**, v. 12, n. 50, 6 jan. 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-5309/12/1/50>.

**EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN).** EN 15804:2012+A2:2019 – *Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products*. Brussels: CEN, 2019.

Fan Huang, Furbo, Li, Solar water heating systems applied to high-rise buildings - Lessons from experiences in China, **Energies** 12 (16) (2019) 3078, <https://doi.org/10.3390/en12163078>.

FARIA, Roberta Carolina Assunção. **Metodologia de avaliação da emissão incorporada de GEE no estoque de edifícios construídos.** 2023. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) — Universidade de Brasília, Brasília, 2023.de Mestrado —Brasília - DF : Universidade de Brasília, maio 2023. Disponível em: <http://repositorio2.unb.br/handle/10482/49730>.

**FERRISS, Lori.** COP29: The Dual Role of Built Buildings as Cultural and Technical Climate Solutions. *Architecture 2030*, 2024. Disponível em: <https://www.architecture2030.org/cop29-the-dual-role-of-built-buildings-as-cultural-and-technical-climate-solutions/>.

FNAIS, Abdulrahman; REZGUI, Yacine; PETRI, Ioan; BEACH, Thomas; YEUNG, Jonathan; GHOROGHI, Ali; KUBICKI, Sylvain. The application of life cycle assessment in buildings: challenges, and directions for future research. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 27, p. 627-654, 4 maio 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-022-02058-5#citeas>.

FRISCHKNECHT, R., RAMSEIER, L.; YANG, W.; BIRGISDOTTIR, H.; CHAE, Ch U.; LÜTZKENDORF, T.; PASSER, T.; BALOUKTSI, M.; BERG, B.; BRAGANÇA, L.. **Comparison of the greenhouse gas emissions of a high-rise residential building assessed with different national LCA approaches - IEA EBC Annex 72.** In: World Sustainable Built Environment conference, 2020. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*,

[s.l.]: IOP Publishing, 2020. v. 588, p. 022029. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/588/2/022029>.

GIORDANO, Roberto; GALLINA, Federica; QUAGLIO, Benedetta. Analysis and assessment of the building life cycle. Indicators and tools for the early design stage. **Sustainability**, v. 13, n. 6467, 7 jun. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/11/6467>.

GIRARD, Marine. **Sufficiency and the Built Environment: reducing demand for land, floor area, materials and energy as the first step towards sustainable buildings**. Paris: French Institute for Buildings Performance (IFPEB); ADEME; A4MT; Global Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC), 2024. Disponível em: <https://www.thesufficiencylab.org/>.

GREENE-DEWASMES, Ginelle. **See how Brazil is benefiting from the Industrial Deep Decarbonization Initiative**. World Economic Forum, 10 ago. 2023. Disponível em: <https://www.weforum.org/stories/2023/08/see-how-brazil-is-benefiting-from-the-industrial-deep-decarbonization-initiative/>. Acesso em: 28 abr. 2025.

H. Elotfy, K.S.S. Abdelmagid, E. Morghany, T.M.F. Ahmed, Energy-efficient tall buildings design strategies: a Holistic approach, **Energy Proc.** 74 (2015) 1358–1369, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.782>.

HABERT, G.; MILLER, S. A.; JOHN, V. M.; PROVIS, J. L.; FAVIER, A.; HORVATH, A.; SCRIVENER, K. L.. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. **Nature Reviews Earth & Environment** 1, p. 559-573, 22 set. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>.

HAWKINS, Will; COOPER, Samuel; ALLEN, Stephen; ROYNON, Jonathan; IBELL, Tim. Embodied carbon assessment using a dynamic climate model: Case-study comparison of a concrete, steel and timber building structure. **Structures**, v. 33, p. 90–98, 1 out. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.013>.

HOXHA. E.; JUSSELME. T.; BRAMBILLA. A.; COZZA. S.; ANDERSEN. M.; REY. E.. Impact Targets as Guidelines towards Low Carbon Buildings: A preliminary concept. In: **PLEA 2016: 32nd International Conference on Passive and Low Energy Architecture**, 2016, Los Angeles. Anais... Los Angeles: PLEA, 2016. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/305395686\\_Impact\\_Targets\\_as\\_Guidelines\\_toward\\_Low\\_Carbon\\_Buildings\\_A\\_preliminary\\_concept](https://www.researchgate.net/publication/305395686_Impact_Targets_as_Guidelines_toward_Low_Carbon_Buildings_A_preliminary_concept).

HUANG, Beijia; CHEN, Yanxi; McDOWALL, Will; TÜRKELİ, Serdar; BLEISCHWITZ, Raimund. Embodied GHG emissions of building materials in Shanghai. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, p. 777–785, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.030>.

INSTITUTO TALANOA. **Política Climática por Inteiro 2023: um balanço dos avanços e lacunas da agenda de mudança do clima no Brasil.** [S.l.]: Instituto Talanoa, 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **All countries targeted for zero-carbon-ready codes for new buildings by 2030: Part of Technology and innovation pathways for zero-carbon-ready buildings by 2030.** Paris: IEA, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/all-countries-targeted-for-zero-carbon-ready-codes-for-new-buildings-by-2030-2>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **CO<sub>2</sub> emissions in 2023: a new record high, but is there light at the end of the tunnel?** Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/33e2badc-b839-4c18-84ce-f6387b3c008f/CO2Emissionsin2023.pdf>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA); ENERGY IN BUILDINGS AND COMMUNITIES TECHNOLOGY COLLABORATION PROGRAMME (EBC). **Benchmarking and target-setting for the life cycle-based environmental performance of buildings.** Energy in Buildings and Communities Technology Collaboration Programme. Uster: treeze Ltd., 2023. ISBN 978-3-9525709-4-4. DOI 10.5281/zenodo.7468752. Disponível em: [https://annex72.iea-ebc.org/Data/publications/EBC\\_Annex\\_72\\_Benchmarking\\_for%20Environmental\\_Performance\\_of\\_Buildings\\_2023.pdf](https://annex72.iea-ebc.org/Data/publications/EBC_Annex_72_Benchmarking_for%20Environmental_Performance_of_Buildings_2023.pdf).

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA); INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA); UN CLIMATE CHANGE HIGH-LEVEL CHAMPIONS. **The Breakthrough Agenda Report 2023: accelerating sector transitions through stronger international collaboration.** Marrakesh Partnership. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/d7e6b848-6e96-4c27-846e-07bd3aef5654/THEBREAKTHROUGHAGENDAREPORT2023.pdf>.

IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the**

**Intergovernmental Panel on Climate Change** [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001

IYER, Aishwarya V.; RAO, Narasimha D.; HERTWICH, Edgar G.. Review of Urban Building Types and Their Energy Use and Carbon Emissions in Life-Cycle Analyses from Low- and Middle-Income Countries. **Environmental Science and Technology**, v. 57, 4 jul. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c06418>.

JAMALUDIN, Farah Adilah Binti; LI, Jioba. Research on low-carbon evaluation of green buildings based on the whole life cycle theory. **SN Applied Sciences**, v. 5, n. 262, 11 set. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05488-4>.

K. Koh, H.H. Al-Kayiem, J.C. Kurnia, Thermal comfort assessment of an office building in tropical climate condition, **Matec Web of Conferences** 225 (2018) 01003, <https://doi.org/10.1051/matecconf/201822501003>.

KARLSSON, Ida; ROOTZÉN, Johan; JOHNSSON, Filip; ERLANDSSON, Martin. Achieving net-zero carbon emissions in construction supply chains – A multidimensional analysis of residential building systems. **Developments in the Built Environment**, v. 8, 23 jul. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2021.100059>.

LONDON ENERGY TRANSFORMATION INITIATIVE (LETI). **Climate emergency design guide: how new buildings can meet UK climate change targets**. Londres: LETI, 2020b. Disponível em: [https://www.leti.uk/\\_files/ugd/252d09\\_3b0f2acf2bb24c019f5ed9173fc5d9f4.pdf](https://www.leti.uk/_files/ugd/252d09_3b0f2acf2bb24c019f5ed9173fc5d9f4.pdf).

LONDON ENERGY TRANSFORMATION INITIATIVE (LETI). **Climate emergency design guide: how new buildings can meet UK climate change targets**. Londres: LETI, 2020a. Disponível em: [https://www.leti.uk/\\_files/ugd/252d09\\_3b0f2acf2bb24c019f5ed9173fc5d9f4.pdf](https://www.leti.uk/_files/ugd/252d09_3b0f2acf2bb24c019f5ed9173fc5d9f4.pdf).

LONDON ENERGY TRANSFORMATION INITIATIVE (LETI). **Embodied carbon primer: supplementary guidance to the Climate Emergency Design Guide**. Londres: LETI, 2020a. Disponível em: [https://www.leti.uk/\\_files/ugd/252d09\\_8ceffcbcfd43cf8a19ab9af5073b92.pdf](https://www.leti.uk/_files/ugd/252d09_8ceffcbcfd43cf8a19ab9af5073b92.pdf).

LONDON ENERGY TRANSFORMATION INITIATIVE (LETI). **Embodied carbon target alignment: supplementary guidance to the Climate Emergency Design Guide**. Londres:

LETI, 2021. Disponível em: [https://www.leti.uk/\\_files/ugd/252d09\\_25fc266f7fe44a24b55cce95a92a3878.pdf](https://www.leti.uk/_files/ugd/252d09_25fc266f7fe44a24b55cce95a92a3878.pdf).

LOW CARBON BUILDING INITIATIVE (LCBI). **Towards consistent carbon reporting & targets: a common European framework to decarbonize real estate.** LCBI certification scheme – new construction v1.0. Londres: LCBI, 2024. Disponível em: <https://www.lowcarbonbuilding.com/wp-content/uploads/2024/01/2024-01-25-lcbi-certification-scheme-new-construction-v10.pdf>.

LÜTZKENDORF, Thomas; BALOUKTSI, Maria. Embodied carbon emissions in buildings: explanations, interpretations, recommendations. **Buildings and Cities**, v. 3, n. 1, p. 964–973, 2022. Disponível em: : <https://doi.org/10.5334/bc.257>.

MACHADO, Nuno Bernardo; SILVESTRE, José Dinis; BOHNE, Rolf André. *Embodied GHG emissions of reinforced concrete and timber structures: relevance, driving factors and target values.* **Building and Environment**, [S. l.], v. 275, p. 112753, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112753>. Acesso em: 29 abr. 2025.

MATERIAL ECONOMICS. **Industrial transformation 2050: pathways to net-zero emissions from EU heavy industry.** Cambridge: University of Cambridge Institute for Sustainability Leadership, 2019. Disponível em: <https://materialeconomics.com/publications/industrial-transformation-2050>.

MELO, Pedro Correa; CALDAS, Lucas Rosse; MASERA, Gabriele; PITTAU, Francesco. The potential of carbon storage in bio-based solutions to mitigate the climate impact of social housing development in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 433, 24 nov. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139862>.

MESA, Jaime A.; FUQUENE-RETAMOSO, Carlos; MAURY-RAMÍREZ, Aníbal. **Life cycle assessment on construction and demolition waste: a systematic literature review.** *Sustainability*, Basel, v. 13, n. 14, p. 7676, 2021. DOI: 10.3390/su13147676.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balanço Energético Nacional 2023: Ano base 2022.** Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topicos-687/BEN2023.pdf>.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Gases de efeito estufa: análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil (1970–2022).** São Paulo:

Observatório do Clima, 2023. Disponível em: <https://www.oc.eco.br/wp-content/uploads/2023/03/SEEG-10-anos-v4.pdf>.

PIMENTA, Rafaela Gravia. **Energia operacional e impactos incorporados em retrofit de saletas comerciais de edifícios de escritórios**. 2020. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Tecnologia e Cidade) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, 2020.

PIOVESAN, Eduardo; MIRANDA, Tiago. **Câmara aprova projeto que regulamenta o mercado de carbono no Brasil; texto segue para sanção**. Brasília: Câmara dos Deputados, 2024. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/noticias/1112521-camara-aprova-projeto-que-regulamenta-o-mercado-de-carbono-no-brasil-texto-segue-para-sancao/>. Acesso em: 22 nov. 2024.

POMPONI, Francesco; MONCASTER, Alice. Embodied carbon mitigation and reduction in the built environment – What does the evidence say? **Journal of Environmental Management**, v. 181, 21 aug. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.08.036>

**PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE - PNUMA. Emissões globais do setor de construção ainda são altas e continuam crescendo**. Nairobi: PNUMA, 2024. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/comunicado-de-imprensa/emissoes-globais-do-setor-de-construcao-ainda-sao>. Acesso em: 15 abr. 2024.

**RAMESH, T.; PRAKASH, Ravi; SHUKLA, K. K.** Life cycle energy analysis of buildings: An overview. **Energy and Buildings**, v. 42, 13 mai. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.007>.

RÖCK, Martin; SAADE, Marcella Ruschi Mendes; BALOUKTSI, Maria; RASMUSSEN, Freja Nygaard; BIRGISDOTTIR, Harpa; FRISCHKNECHT, Rolf; HABERT, Guillaume; LÜTZKENDORF, Thomas; PASSER, Alexander .Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation. **Applied Energy**, v. 258, 15 jan. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114107>.

RÖCK, Martin; SØRENSEN, Andreas; TOZAN, Buket; STEINMANN, Jacob; HORUP, Lise Hvid; LE DEN, Xavier; BIRGISDOTTIR, Harpa. **Towards embodied carbon benchmarks for buildings in Europe: #2 Setting the baseline: A bottom-up approach**. Brussels:

- Rambøll, 2022. Disponível em: [https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/518767365/EU\\_ECB\\_2\\_Setting\\_the\\_baseline.pdf](https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/518767365/EU_ECB_2_Setting_the_baseline.pdf).
- SHI, Ligang; QI, Xinzhu; YANG, Zhaojing; TAO, Lulu; LI, Yuqing; QIU, Jinghan; JIANG, Xintong. Embodied carbon assessment of buildings: A review of data sources, methods and tools. *Journal of Building Engineering*, [S.l.], v. 70, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106396>.
- SILVA, Marcella Clarimundo Ferreira; CALDAS, Lucas Rosse; FIGUEIREDO, Chenia Rocha. Avaliação de emissões de carbono: Análise comparativa entre dados de projeto e de obra nas etapas de fundação e estrutura. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024. *Anais [...]*. Porto Alegre: ANTAC, 2024. p. 1–11. DOI:10.46421/entac.v20i1.6056. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/6056>.
- SILVA, V. G.; SILVA, M. G. Seleção de materiais e edifícios de alto desempenho ambiental. Em: **Edifício Ambiental**. São Paulo, Oficina de Textos, 2015. p. 129–152.
- UK GREEN BUILDING COUNCIL (UKGBC). **Net Zero Carbon Buildings: A Framework Definition**. Londres: UKGBC, abr. 2019. Disponível em: <https://www.ukgbc.org/wp-content/uploads/2019/04/Net-Zero-Carbon-Buildings-A-framework-definition.pdf>.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector**. Global Status Report for Buildings and Construction 2023. Nairobi: UNEP, 2024. Disponível em: [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/45095/global\\_status\\_report\\_buildings\\_construction\\_2023.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/45095/global_status_report_buildings_construction_2023.pdf?sequence=3&isAllowed=y).
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Broken Record – Temperatures Hit New Highs, Yet World Fails to Cut Emissions (Again)**. Emissions Gap Report 2023. Nairobi: UNEP, 2023. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/43922/EGR2023.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Building Materials and the Climate: Constructing a New Future**. Nairobi: UNEP, 2023. Disponível em:

[https://www.unep.org/resources/report/building-materials-and-climate-constructing-new-future.](https://www.unep.org/resources/report/building-materials-and-climate-constructing-new-future)

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP); GLOBAL ALLIANCE FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION (GlobalABC). **2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector.** Nairobi: UNEP, 2022. Disponível em: [https://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction.](https://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction)

W. Zhou, H.S. Lee, S. Tian, Accelerating Net Zero Transition of the Buildings and Construction Sector in Developing Asia and the Pacific, **Asian Development Bank**, 2023.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD); ARUP. **Net-zero buildings: Halving construction emissions today.** [S.l.]: WBCSD, dez. 2022. Disponível em: [https://www.wbcsd.org/wp-content/uploads/2023/09/Net-zero-buildings\\_Halving-construction-emissions-today.pdf](https://www.wbcsd.org/wp-content/uploads/2023/09/Net-zero-buildings_Halving-construction-emissions-today.pdf). Acesso em: 14 abr. 2024.

YOKOYAMA, Keizo; HOULIHAN WIBERG, Aoife Anne Marie; BIRGISDÓTTIR, Harpa; MALMQVIST, Tove; MONCASTER, Alice; SEO, Seongwon; PASSER, Alexander; LÜTZKENDORF, Thomas; BALOUKTSI, Maria; NYGAARD RASMUSSEN, Freja; MISTRETTA, Marina; OKA, Tatsuo; CHAE, Chang-U; FRISCHKNECHT, Rolf; HÁJEK, Petr; ZELEZNA, Jana; YOKOO, Noriyoshi (Ed.). **Evaluation of Embodied Energy and CO<sub>2</sub>eq for Building Construction (Annex 57): Overview of Annex 57 Results.** Tokyo: Institute for Building Environment and Energy Conservation, 2017. Disponível em: [https://www.iea-ebc.org/Data/publications/EBC\\_Annex\\_57\\_Results\\_Overview.pdf](https://www.iea-ebc.org/Data/publications/EBC_Annex_57_Results_Overview.pdf). Acesso em: 28 abr. 2024.