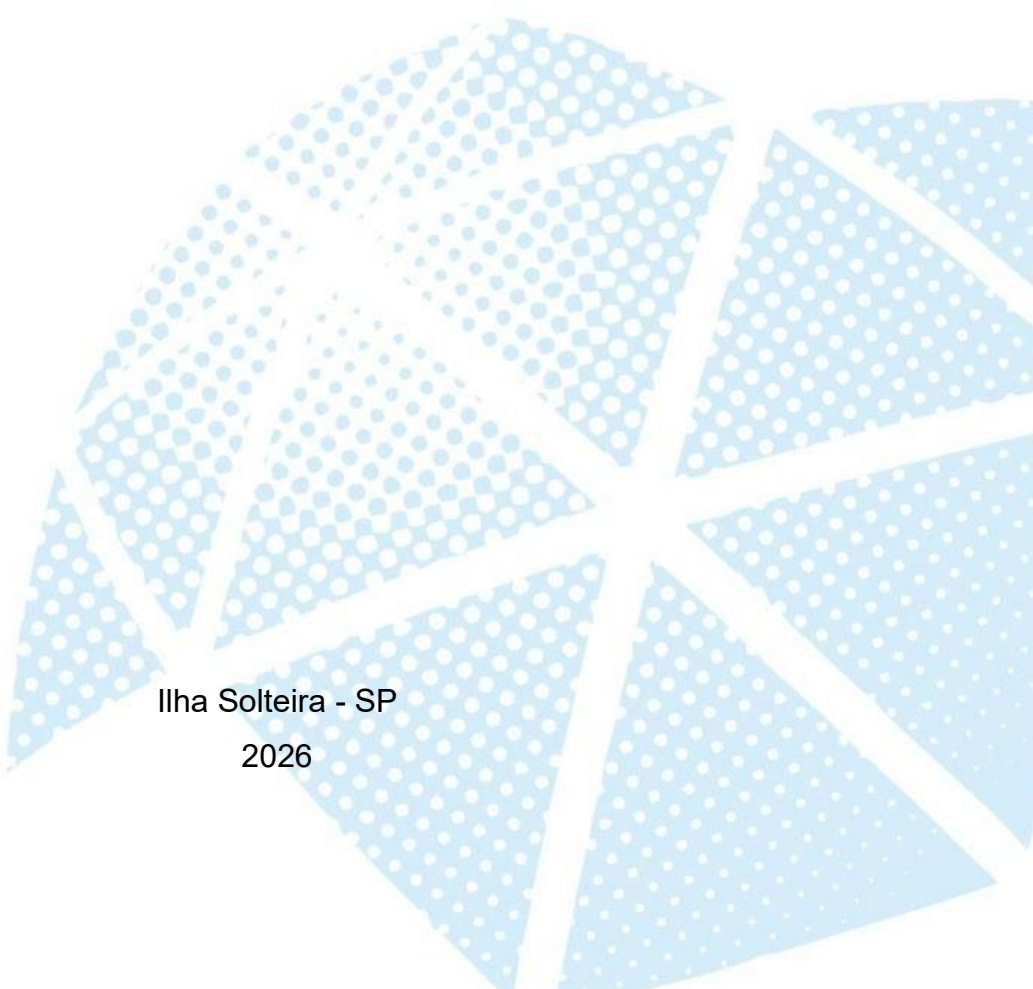


**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

MATHEUS PINHEIRO LORENÇO DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) EM GALPÕES LOGÍSTICOS:
Análise Comparativa e Desenvolvimento de um Benchmark de
Sustentabilidade**

Ilha Solteira - SP
2026



MATHEUS PINHEIRO LORENÇO DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) EM GALPÕES LOGÍSTICOS:

Análise Comparativa e Desenvolvimento de um Benchmark de Sustentabilidade.

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Estadual
Paulista (UNESP), Faculdade de
Engenharia do Campus de Ilha Solteira,
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Artur Pantoja
Marques.

Ilha Solteira - SP

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

O48a Oliveira, Matheus Pinheiro Lorenço de.
Avaliação do ciclo de vida (ACV) em galpões logísticos: análise comparativa e desenvolvimento de um benchmark de sustentabilidade / Matheus Pinheiro Lorenço de Oliveira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
125 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira,
2026

Orientador: Artur Pantoja Marques.

Inclui bibliografia

1. Avaliação do ciclo de vida. 2. Carbono incorporado. 3. Galpões logísticos.
4. Escória granulada de alto-forno. 5. Benchmark ambiental.

MATHEUS PINHEIRO LORENÇO DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA EM GALPÕES LOGÍSTICOS: Análise Comparativa e Desenvolvimento de um Benchmark de Sustentabilidade

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro Civil, junto ao Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de Ilha Solteira

Aprovado em: 07/07/2026

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Artur Pantoja Marques
UNESP - Faculdade de Engenharia - Câmpus de Ilha Solteira (Orientador)

Prof. Dr. Adriano Souza
UNESP - Faculdade de Engenharia - Câmpus de Ilha Solteira (Examinador)

Prof. Dra. Claudia Scoton Antonio Marques
UNESP - Faculdade de Engenharia - Câmpus de Ilha Solteira (Examinadora)

Dedico este trabalho, primeiramente, a Deus, por me conceder força, sabedoria e perseverança ao longo desta trajetória acadêmica.

À minha família, pelo apoio incondicional, pelo amor constante e pelo exemplo de resiliência e dedicação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Artur Pantoja Marques, meu orientador, pela mentoria, pela paciência e pelo comprometimento ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao Eng. Renato Salgado, do CTE – Centro de Tecnologia de Edificações, pelos ensinamentos técnicos e pela expertise em sustentabilidade que orientaram esta pesquisa.

À Eng^a Haiany Miranda, pelas conversas e contribuições técnicas que enriqueceram o trabalho.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, minha sincera gratidão.

RESUMO

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) constitui uma metodologia científica para quantificar os impactos ambientais da construção civil e subsidiar estratégias de mitigação, especialmente em relação ao carbono incorporado das edificações. Este trabalho caracteriza o perfil de carbono incorporado inicial de galpões logísticos no Estado de São Paulo e propõe um sistema de referência de desempenho de carbono incorporado (benchmark) para essa tipologia construtiva. Para tanto, analisou-se uma amostra de dezenove galpões logísticos por meio da ferramenta computacional eTool, adotando-se o método de caracterização CML-IA para a categoria Potencial de Aquecimento Global (GWP), expressa em quilogramas de dióxido de carbono equivalente por metro quadrado ($\text{kgCO}_2\text{e/m}^2$), com escopo concentrado nos módulos de produção de materiais (A1–A3), em conformidade com as normas ISO 14040:2009, ISO 14044:2006 e EN 15978:2011. Os dados foram tratados por estatística descritiva, análise de correlação e regressão log-log, comparando-se os cenários Baseline, representativo da referência de mercado, e Design Final, correspondente à condição otimizada dos projetos. Os resultados indicam redução média de 17,5% e mediana de 19,5% do GWP/ m^2 entre os cenários, com amplitude de 1,0% a 33,4%, embora permaneça elevada heterogeneidade entre os projetos, evidenciada por coeficiente de variação de 36,5% no cenário otimizado. O concreto destaca-se como principal vetor de impacto e de mitigação, respondendo, em média, por 93,5% das reduções obtidas, sendo a substituição parcial de cimento por escória granulada de alto-forno (BFS/GGBS) uma das estratégias mais eficazes observadas. Conclui-se que o benchmark percentílico proposto oferece uma referência comparável e replicável para apoiar a tomada de decisão sustentável em galpões logísticos, contribuindo para práticas projetuais alinhadas à descarbonização da construção civil.

Palavras-chave: avaliação do ciclo de vida; carbono incorporado; galpões logísticos; escória granulada de alto-forno; benchmark ambiental.

ABSTRACT

Life Cycle Assessment (LCA) is a scientific methodology used to quantify the environmental impacts of the construction sector and support mitigation strategies, especially regarding the embodied carbon of buildings. This study characterizes the initial embodied carbon profile of logistics warehouses in the State of São Paulo and proposes an embodied carbon performance reference system, or benchmark, for this building typology. To this end, a sample of nineteen logistics warehouses was analyzed using the eTool software, adopting the CML-IA characterization method for the Global Warming Potential (GWP) category, expressed in kilograms of carbon dioxide equivalent per square meter ($\text{kgCO}_2\text{e/m}^2$), with the scope focused on the material production modules (A1–A3), in accordance with ISO 14040:2009, ISO 14044:2006, and EN 15978:2011 standards. The data were processed through descriptive statistics, correlation analysis, and log-log regression, comparing the Baseline scenario, representative of the market reference, and the Final Design scenario, corresponding to the optimized condition of the projects. The results indicate an average reduction of 17.5% and a median reduction of 19.5% in GWP/m^2 between the scenarios, with a range from 1.0% to 33.4%, although high heterogeneity remains among the projects, as evidenced by a coefficient of variation of 36.5% in the optimized scenario. Concrete stands out as the main driver of both impact and mitigation, accounting, on average, for 93.5% of the reductions achieved, with the partial replacement of cement by blast furnace slag (BFS/GGBS) being one of the most effective strategies observed. It is concluded that the proposed percentile benchmark provides a comparable and replicable reference to support sustainable decision-making in logistics warehouses, contributing to design practices aligned with the decarbonization of the construction sector.

Keywords: life cycle assessment; embodied carbon; logistics warehouses; ground granulated blast-furnace slag; environmental benchmark.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cobertura dos principais sistemas de certificação ambiental em relação à avaliação do carbono incorporado	4
Figura 2 – Distribuição geográfica dos galpões logísticos analisados no Estado de São Paulo.....	1
Figura 3 – Diagrama conceitual das hipóteses de pesquisa e seus resultados	3
Figura 4 – Representação das etapas do ciclo de vida de produtos e edificações conforme módulos A–D	8
Figura 5 - Anatomia de um galpão Logístico	14
Figura 6 – Evolução do estoque nacional de galpões logísticos (2021–2025) e absorção líquida em São Paulo.....	15
Figura 7 – Fator de emissão de GWP dos principais materiais cimentícios suplementares em relação ao clínquer Portland	18
Figura 8 – Delineamento metodológico da pesquisa.....	20
Figura 9 – Fluxograma do tratamento estatístico dos dados: etapas, métodos e conexão com as hipóteses de pesquisa.....	33
Figura 10 – Escala visual do sistema de benchmark de carbono incorporado: seis classes (A+ a E) com intervalos em kgCO ₂ e/m ²	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Empreendimentos e número de galpões integrantes da amostra.	22
Tabela 2 – Dados individuais dos 19 galpões logísticos da amostra	40
Tabela 3 – Estatística descritiva do Baseline, Design Final e Redução GWP.	44
Tabela 4 – Contribuição média por módulo do ciclo de vida.	47
Tabela 5 – Participação relativa dos materiais e sistemas no GWP total do cenário baseline	50
Tabela 6 – Estratégias de redução GWP: abrangência e eficácia.	53
Tabela 7 – Correlações com o percentual de redução de GWP	58
Tabela 8 – Concordância entre coeficientes de correlação para pares-chave	60
Tabela 9 – Resultados da regressão log-log: $\ln(\text{GWP_B}/\text{m}^2) \sim \ln(\text{Área construída})$.	63
Tabela 10 – Classificação dos 19 galpões no benchmark de carbono incorporado..	68
Tabela A.1 – Dados individuais dos galpões logísticos analisados e classificação no benchmark.....	93
Tabela B.1 – Participação dos materiais no GWP total e massa de concreto por m ²	95
Tabela C.1 – Estratégias de descarbonização adotadas no Design Final por galpão	97

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – GWP/m ² Baseline e Design Final dos 19 galpões logísticos analisados (kgCO ₂ e/m ²)	42
Gráfico 2 – Redução percentual do GWP/m ² entre Baseline e Design Final, por galpão	43
Gráfico 3 – Distribuição do GWP/m ² Baseline: histograma e boxplot com percentis (n = 19)	46
Gráfico 4 – Contribuição média por módulo do ciclo de vida para o GWP total (Baseline, n = 19)	48
Gráfico 5 – Participação média dos principais materiais no GWP total	51
Gráfico 6 – Massa de concreto por m ² versus GWP/m ² Baseline, com reta de tendência	57
Gráfico 7 – Dispersão entre número de estratégias de descarbonização e redução percentual do GWP/m ² (n = 19)	60
Gráfico 8 – Matriz de correlações de Pearson entre as variáveis analisadas (n = 19)	62
Gráfico 9 – Relação entre área construída e GWP/m ² Baseline em escala log-log, com reta de regressão	63
Gráfico 10 – Posição dos 19 galpões nas faixas do benchmark percentílico (GWP/m ² Baseline, kgCO ₂ e/m ²)	67
Gráfico 11 – Mobilidade de classes entre Baseline e Design Final dos 19 galpões logísticos	70

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Variáveis principais e suas operacionalizações	24
Quadro 2 – Status dos módulos do ciclo de vida nos estudos de ACV da amostra ..	27
Quadro 3 – Definição das classes do sistema de benchmark de carbono incorporado	35
Quadro 4 – Benchmark Proposto — Sistema de Classificação.....	40
Quadro 5 - Correlações de Pearson com o GWP/m ² Baseline (n = 19)	56
Quadro 6 – Sistema de benchmark de carbono incorporado para galpões logísticos	65
Quadro 7 – Síntese da verificação das hipóteses de pesquisa	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AQUA-HQE	Alta Qualidade Ambiental – <i>Haute Qualité Environnementale</i>
BFS	Escória granulada de alto-forno (<i>Blast Furnace Slag</i>)
CML-IA	<i>Institute of Environmental Sciences</i> - Impacto Ambiental
CTE	Centro de Tecnologia de Edificações
EC3	Embodied Carbon in Construction Calculator
EDGE	Excellence in Design for Greater Efficiencies
EN	<i>European Norm</i>
EPD	<i>Environmental Product Declaration</i>
GFA	Gross Floor Area
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
INMETRO	<i>Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>
MNA	<i>Módulo Não Avaliado</i>
PBE Edifica	<i>Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações</i>
PROCEL	<i>Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica</i>
RSP	<i>Reference Service Period</i>
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Contextualização do tema	1
1.2 Problema de pesquisa	3
1.3 Objetivo geral	1
1.5 Objetivos específicos	1
1.6 Hipóteses de pesquisa	2
1.7 Delimitação do estudo	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Avaliação do Ciclo de Vida aplicada a edificações	5
2.1.1 Fundamentos e estrutura normativa	5
2.1.2 As quatro fases da ACV e os módulos do ciclo de vida	6
2.1.3 O indicador GWP como métrica central da ACV de edificações	8
2.1.4 <i>Benchmarking</i> em ACV de edificações: conceitos e boas práticas	9
2.2 Carbono incorporado em edifícios não residenciais	10
2.2.1 Conceito e crescente relevância do carbono incorporado	10
2.2.2 Estado da arte internacional em carbono incorporado de edificações	11
2.2.4 O mercado de galpões logísticos no Brasil e em São Paulo	13
2.3 Materiais cimentícios e estratégias de descarbonização	15
2.3.1 O cimento Portland e sua contribuição ao carbono incorporado	15
2.3.2 Materiais cimentícios suplementares	16
2.3.3 BFS em fundações e pisos industriais de galpões logísticos	18
3 METODOLOGIA	20
3.1 Caracterização da pesquisa	20
3.2 Descrição da amostra	21
3.2.1 Composição e critérios de inclusão	21
3.2.2 Características gerais da amostra	22
3.3 Fontes e coleta de dados	23
3.3.1 Documentos primários	23
3.3.2 Bancos de dados consolidados	24
3.3.3 Operacionalização das variáveis	24
3.4 Escopo do ciclo de vida avaliado	26
3.4.1 Período de referência do estudo	26

3.4.2 Unidade funcional	26
3.4.3 Módulos avaliados e não avaliados	27
3.5 Ferramenta computacional e método de caracterização	28
3.5.1 Ferramenta de ACV: eTool	28
3.5.2 Método de caracterização: CML-IA <i>Baseline</i> V4.5	29
3.5.3 Qualidade dos dados de inventário e Declarações Ambientais de Produto	29
3.5.4 Revisão independente	30
3.6 Tratamento estatístico dos dados	30
3.6.1 Estatística descritiva	30
3.6.2 Análise de correlação	31
3.6.3 Regressão log-log para análise do efeito de escala	32
3.6.4 Ferramentas computacionais	32
3.7 Construção do sistema de <i>benchmark</i>	34
3.7.1 Justificativa da abordagem percentilica	34
3.7.2 Definição das classes e limiares	35
3.8 Limitações da amostra e cuidados metodológicos	36
3.8.1 Tamanho amostral e caráter exploratório	36
3.8.2 Concentração geográfica	37
3.8.3 Relevância geográfica dos dados de inventário	37
3.8.4 Ausência de EPDs específicos nos modelos eTool	37
3.8.5 <i>Cenários Design Final sem revisão independente concluída</i>	38
3.8.6 <i>Outlier</i> estatístico — Galpão E09-G3	38
3.8.7 Definição e contagem de N_Estratégias	39
4 RESULTADOS	40
4.1 Perfil estatístico do GWP/m ²	40
4.1.1 Caracterização individual dos 19 galpões	40
4.1.2 Estatística descritiva: <i>Baseline</i> e <i>Design Final</i>	44
4.1.3 Distribuição do GWP/m ² e heterogeneidade amostral	45
4.2 Contribuição por módulo do ciclo de vida	46
4.2.1 Perfil de contribuição modular: dominância do A1–A3	46
4.3 Análise de materiais e sistemas construtivos	49
4.3.1 Participação relativa dos materiais no GWP total	49

4.3.2 O papel do concreto: massa versus intensidade carbônica	52
4.3.3 Estabilidade da intensidade carbônica: variação por quantidade, não por eficiência	52
4.4 Estratégias de redução de carbono incorporado	53
4.4.1 Eficácia por tipo de estratégia	53
4.4.2 Dominância do concreto nas reduções: 93,5% e razão 4,39:1	54
4.4.3 O paradoxo da eficiência: qualidade supera quantidade	55
4.5 Análise de correlações estatísticas	56
4.5.1 Correlações com o GWP/m ² <i>Baseline</i> : identificação dos preditores	56
4.5.2 Correlações com o percentual de redução de GWP	58
4.5.3 Verificação de robustez: Pearson, Spearman e Kendall	60
4.6 Efeito de escala: análise de regressão log-log	63
4.6.1 Resultados do modelo de regressão	63
4.6.2 Interpretação da elasticidade e do efeito de escala	64
4.6.3 Limites do modelo e interpretação do R ²	64
4.7 Proposta de sistema de <i>benchmark</i> de carbono incorporado	65
4.7.1 Limiares de classificação derivados da distribuição empírica	65
4.7.2 Classificação individual dos 19 galpões	68
4.7.3 Mobilidade entre classes: o <i>benchmark</i> como instrumento de avaliação de estratégias	69
4.7.4 Discussão: validade, limitações e perspectivas do <i>benchmark</i>	70
4.8 Síntese dos resultados e verificação das hipóteses de pesquisa	71
5 DISCUSSÃO	73
5.1 Síntese dos Principais Achados	73
5.2 Verificação das Hipóteses de Pesquisa	75
5.3 Contribuições Científicas e Práticas	76
5.3.1 Contribuições ao Conhecimento Científico	76
5.4 Contribuições à Prática Profissional e Setorial	77
5.5 Limitações Reconhecidas	78
5.6 Recomendações para Pesquisas Futuras	79
6. CONCLUSÃO	82
APÊNDICE A — DADOS INDIVIDUAIS DOS 19 GALPÕES LOGÍSTICOS	93
APÊNDICE B — COMPOSIÇÃO DE MATERIAIS E ANÁLISE DE CARBONO (BASELINE)	95

APÊNDICE C — ESTRATÉGIAS DE DESCARBONIZAÇÃO POR GALPÃO (DESIGN FINAL)	97
APÊNDICE D — ROTINA COMPUTACIONAL DE ANÁLISE ESTATÍSTICA	101

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do tema

A indústria da construção civil ocupa posição central no debate global sobre mudanças climáticas. Segundo o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, o setor de edifícios e construção respondeu, em 2022, por aproximadamente 37% das emissões globais de dióxido de carbono relacionadas ao uso de energia e processos industriais (UNEP, 2022). Essa participação expressiva coloca o setor como alvo prioritário das políticas de descarbonização, especialmente à luz dos compromissos firmados no Acordo de Paris (UNFCCC, 2015) e das metas de neutralidade climática progressivamente incorporadas por governos, fundos de investimento e grandes corporações ao redor do mundo.

No campo da construção sustentável, distinguem-se duas dimensões complementares de emissões: o carbono operacional, associado ao consumo de energia durante a vida útil da edificação, incluindo aquecimento, refrigeração, iluminação e demais sistemas prediais; e o carbono incorporado (*embodied carbon*), relacionado às emissões decorrentes do ciclo de vida dos materiais de construção, desde a extração e o processamento das matérias-primas até a demolição e a destinação final. Historicamente, as normativas, exigências regulatórias e sistemas de avaliação ambiental de edificações concentraram-se predominantemente no carbono operacional, por meio de metas voltadas à redução do consumo energético na fase de uso (Royal Institution of Chartered Surveyors, 2023). Contudo, à medida que os edifícios se tornam operacionalmente mais eficientes, o carbono incorporado passa a representar parcela crescente das emissões totais do ciclo de vida, podendo atingir ou superar 50% do total em edifícios novos de alto desempenho energético (Lützkendorf; Frischknecht, 2022; Röck *et al.*, 2020; World Green Building Council, 2019).

Nesse cenário, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) consolidou-se como uma metodologia normalizada e amplamente utilizada para a quantificação dos impactos ambientais associados às edificações, incluindo o carbono incorporado. Estruturada pelas normas ISO 14040:2009 e ISO 14044:2006 e, no contexto específico das construções, pela norma europeia EN 15978:2011, a ACV permite quantificar e organizar os fluxos de materiais, energia e emissões ao longo do ciclo de vida do edifício, desde a extração das matérias-primas até as etapas de uso,

manutenção, demolição e destinação final. Essa abordagem possibilita identificar os sistemas construtivos, materiais e fases do ciclo de vida que concentram os maiores impactos ambientais. No contexto deste trabalho, adota-se como indicador central o Potencial de Aquecimento Global, ou *Global Warming Potential* (GWP), expresso em quilogramas de dióxido de carbono equivalente por metro quadrado de área construída ($\text{kgCO}_2\text{e/m}^2$), por sua relação direta com a mensuração do carbono incorporado e com as estratégias de descarbonização da construção civil (European Committee for Standardization, 2011; International Organization for Standardization, 2006a, 2006b; Royal Institution of Chartered Surveyors, 2023).

No Brasil, o segmento de galpões e condomínios logísticos registrou expansão expressiva nos últimos anos, impulsionado pela reestruturação das cadeias de distribuição, pela crescente demanda por infraestrutura de armazenagem próxima aos grandes centros urbanos e pelo crescimento do comércio eletrônico (Colliers, 2025; Cushman & Wakefield, 2025). O Estado de São Paulo destaca-se como principal polo logístico do país, concentrando parcela significativa da atividade de locação e do estoque de empreendimentos logísticos, em razão de sua relevância econômica, da proximidade com grandes centros consumidores e da infraestrutura de transporte disponível (CBRE, 2024; Colliers, 2024; ILOS, 2023). No contexto da amostra analisada neste trabalho, os empreendimentos apresentam grande escala e características estruturais específicas, como lajes de piso industrial espessas, fundações profundas em estacas, estruturas metálicas de grandes vãos e baixa proporção de vedações externas. Essas características determinam um perfil particular de uso de materiais e, conseqüentemente, de emissões incorporadas, distinto daquele observado em edifícios residenciais ou comerciais.

Apesar dessa relevância ambiental e econômica, a literatura científica ainda apresenta lacunas quanto à caracterização sistemática do perfil de carbono incorporado de galpões logísticos brasileiros por meio de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), especialmente no que se refere à construção de referências de desempenho específicas para essa tipologia e contexto regional. Iniciativas internacionais, como o protocolo Level(s), desenvolvido pela Comissão Europeia, e ferramentas e estudos de *benchmark* associados ao *Embodied Carbon in Construction Calculator* (EC3) e à *Carbon Leadership Forum*, têm avançado na estruturação de indicadores, bases de dados e referenciais de carbono incorporado para edificações. Entretanto, sua

aplicabilidade direta ao contexto brasileiro é limitada por diferenças na matriz de materiais, nos processos produtivos, nos padrões construtivos locais, na disponibilidade de Declarações Ambientais de Produto (EPDs) e nas condições climáticas e logísticas específicas de cada região.

É nessa lacuna — entre a disponibilidade crescente de dados de ACV em projetos reais e a ausência de *benchmarks* científicos calibrados para a realidade produtiva brasileira — que se insere o presente trabalho.

1.2 Problema de pesquisa

O problema que motivou esta investigação surgiu de uma constatação prática e metodológica. Embora parte do mercado de construção sustentável no Brasil utilize certificações ambientais voluntárias, como *LEED*, *AQUA-HQE* e *EDGE*, para orientar o desempenho ambiental de edificações, esses sistemas operam predominantemente por meio de requisitos, créditos, critérios de desempenho ou reduções relativas em relação a edifícios de referência ou edifícios locais padrão (Fundação Carlos Alberto Vanzolini, [2026]; *Green Business Certification Inc.*, 2026; *U.S. Green Building Council*, 2026).

O *LEED*, por exemplo, contempla créditos associados à Avaliação do Ciclo de Vida e à redução de impactos ambientais em comparação com um edifício de referência, incluindo o Potencial de Aquecimento Global como uma das categorias avaliadas (*Green Business Certification Inc.*, 2017; *One Click LCA*, 2025).

O *EDGE* exige redução mínima projetada de energia, água e carbono incorporado em materiais em relação a um edifício local padrão (*Green Business Certification Inc.*, 2026).

O *AQUA-HQE*, por sua vez, constitui uma certificação internacional da construção de alta qualidade ambiental, desenvolvida a partir da certificação francesa *HQE* e aplicada no Brasil pela Fundação Carlos Alberto Vanzolini (Fundação Carlos Alberto Vanzolini, [2026]). Contudo, tais sistemas não estabelecem, de forma pública e específica, uma meta absoluta de carbono incorporado baseada em dados empíricos da realidade construtiva brasileira para galpões logísticos. Não há, portanto, uma referência nacional de desempenho em GWP por metro quadrado específica para esse tipo de edificação.

A Figura 1 apresenta um comparativo que sintetiza a cobertura de cada certificação verde em relação às dimensões essenciais da avaliação do carbono incorporado, evidenciando a lacuna existente no mercado brasileiro:

Figura 1 – Cobertura dos principais sistemas de certificação ambiental em relação à avaliação do carbono incorporado

Critério de avaliação	LEED v4	LEED v5	EDGE	AQUA-HQE	ACV Completa ISO 14040
Inventário de carbono incorporado	● Parcial	● Sim	● Não	● Não	● Sim
GWP como indicador obrigatório	● Parcial	● Sim	● Não	● Não	● Sim
Módulos A1–A3 Fabricação	● Parcial	● Sim	● Não	● Não	● Sim
Módulos B Uso	● Não	● Parcial	● Não	● Não	● Sim
Módulos C Fim de vida	● Parcial	● Parcial	● Não	● Não	● Sim
Módulo D Além do sistema	● Não	● Não	● Não	● Não	● Opcional
Conformidade ISO 14040/44	● Parcial	● Parcial	● Não	● Não	● Sim

● Sim atende

● Parcial atende em parte

● Não não contempla

● Opcional facultativo

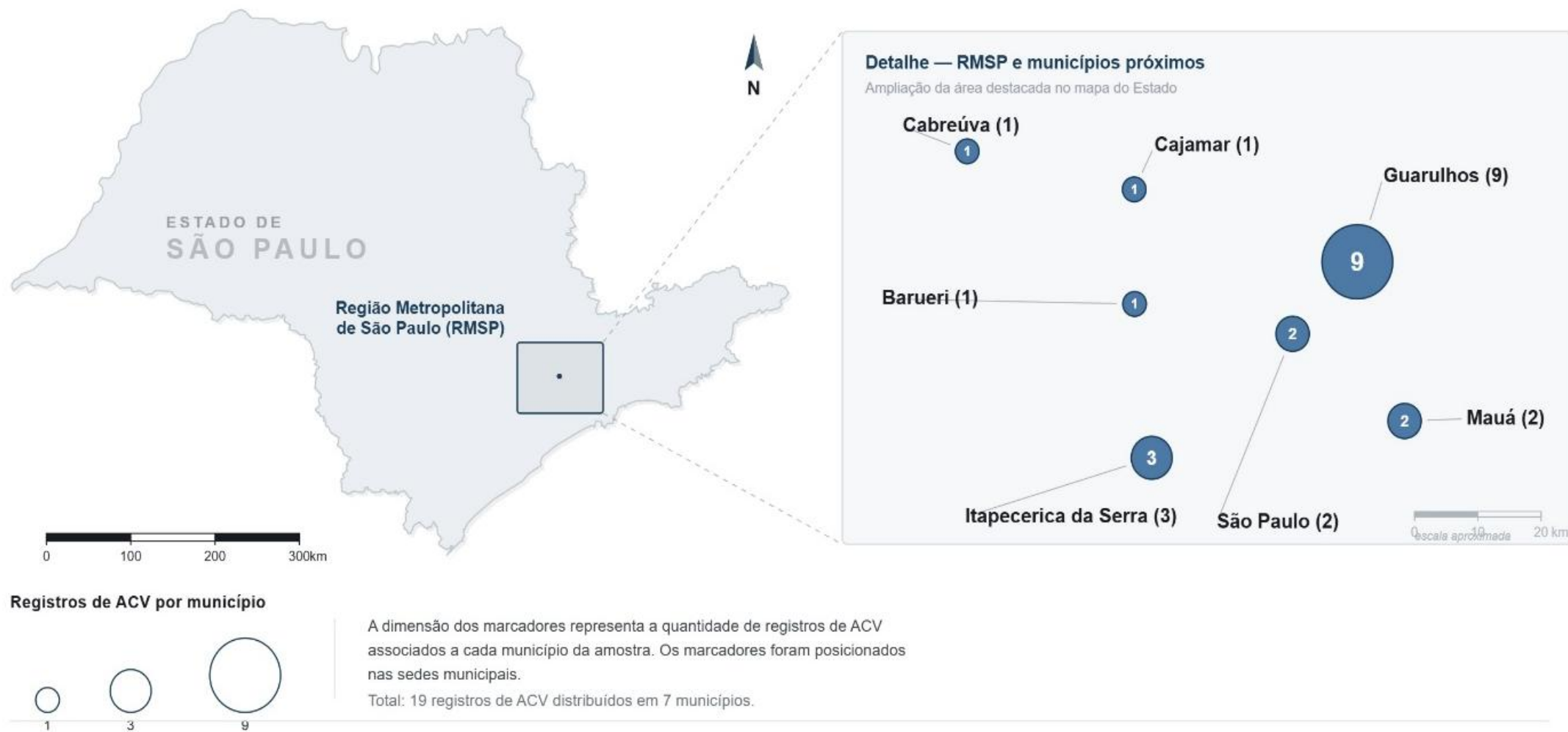
Elaboração própria · módulos conforme EN 15978 / ISO 21936

Fonte: Elaborado pelo autor com base em USGBC (2024), IFC (2024) e CERWAY (2024).

As consequências práticas dessa ausência são concretas. Equipes de projeto não dispõem de parâmetros objetivos para avaliar se uma determinada solução construtiva resulta em desempenho ambiental melhor ou pior do que a prática corrente do setor. Incorporadores e clientes não conseguem comparar empreendimentos com base em métricas padronizadas de carbono incorporado.

E as oportunidades de redução de emissões mais expressivas — aquelas ligadas a materiais e sistemas específicos — permanecem identificadas apenas de forma qualitativa, sem ancoragem em dados estatisticamente representativos.

Figura 2 – Distribuição geográfica dos galpões logísticos analisados no Estado de São Paulo



A análise de 19 galpões logísticos no Estado de São Paulo, todos avaliados por ACV com a mesma ferramenta computacional eTool e pelo mesmo consultor especializado (CTE — Centro de Tecnologia de Edificações), com processo de revisão independente conduzido pela Cerclos — concluído em 15 dos 19 estudos até o fechamento desta pesquisa (ver Seção 3.8.5) —, oferece uma base empírica homogênea e metodologicamente robusta para enfrentar esse problema.

A partir de dados de emissões de carbono incorporado em escala de m^2 , coletados em projetos reais, torna-se possível perguntar: qual é, de fato, o perfil de carbono incorporado dessa tipologia? Quais fatores físicos e construtivos melhores explicam a variação observada entre empreendimentos? Quais estratégias de redução demonstram maior eficácia nas condições do mercado brasileiro? E que sistema de referências pode ser proposto para orientar projetos futuros?

A pergunta de pesquisa que sintetiza essas questões é qual é o perfil de carbono incorporado dos galpões logísticos no Estado de São Paulo — mensurado pelo indicador GWP por metro quadrado —, quais são os fatores que mais explicam sua variação entre empreendimentos e que referências de desempenho ambiental podem ser propostas para esta tipologia construtiva?

1.3 Objetivo geral

Caracterizar o perfil de carbono incorporado de galpões logísticos no Estado de São Paulo por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), identificar os fatores que explicam a variação do indicador GWP por metro quadrado entre empreendimentos e propor um sistema de referências de desempenho ambiental — *benchmark* — para essa tipologia construtiva.

1.5 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos orientam a investigação:

- a) Descrever o perfil estatístico do indicador GWP/ m^2 da amostra, nas condições de *Baseline* (*Business as Usual*) e *Design Final* (otimizado), incluindo medidas de tendência central, dispersão e distribuição;

- b) Quantificar a contribuição percentual de cada módulo do ciclo de vida avaliado — A1–A3, A4, B4, C1, C2 e C4 — para o GWP total, identificando onde se concentra o maior potencial de intervenção;
- c) Analisar a participação relativa dos principais materiais e sistemas construtivos no GWP total e em kgCO₂e por tonelada, com ênfase no concreto e no aço;
- d) Investigar as correlações estatísticas entre o GWP/m² e variáveis físicas e construtivas dos galpões — como massa de concreto por m², área construída, altura e composição dos sistemas de fundação e piso —, utilizando os coeficientes de Pearson, Spearman e Kendall;
- e) Avaliar a eficácia das estratégias de redução de carbono incorporado aplicadas nos projetos otimizados, com destaque para a substituição parcial do cimento Portland por cimento com escória de alto-forno (BFS), e quantificar a contribuição relativa do concreto e do aço nas reduções observadas;
- f) Verificar a existência de efeito de escala na intensidade de carbono por meio de análise de regressão log-log entre a área construída e o GWP/m², estimando a elasticidade da relação;
- g) Propor um sistema de classificação de desempenho em carbono incorporado, com faixas de referência baseadas na distribuição empírica dos dados, que possa ser aplicado como instrumento de avaliação comparativa a novos projetos de galpões logísticos no contexto paulista.

1.6 Hipóteses de pesquisa

Com base na fundamentação teórica e na análise preliminar dos dados, três hipóteses testáveis orientam esta investigação:

H1 — Dominância do concreto como preditor do carbono incorporado.

A massa de concreto por metro quadrado é o principal fator explicativo da variação do GWP/m² entre os galpões da amostra, com correlação linear positiva e estatisticamente significativa com o indicador de carbono incorporado no cenário Baseline (coeficiente de Pearson esperado acima de 0,90, $p < 0,05$). Essa hipótese fundamenta-se na elevada participação do concreto no GWP total e na estabilidade de sua intensidade carbônica entre projetos, que indica ser o quantitativo empregado

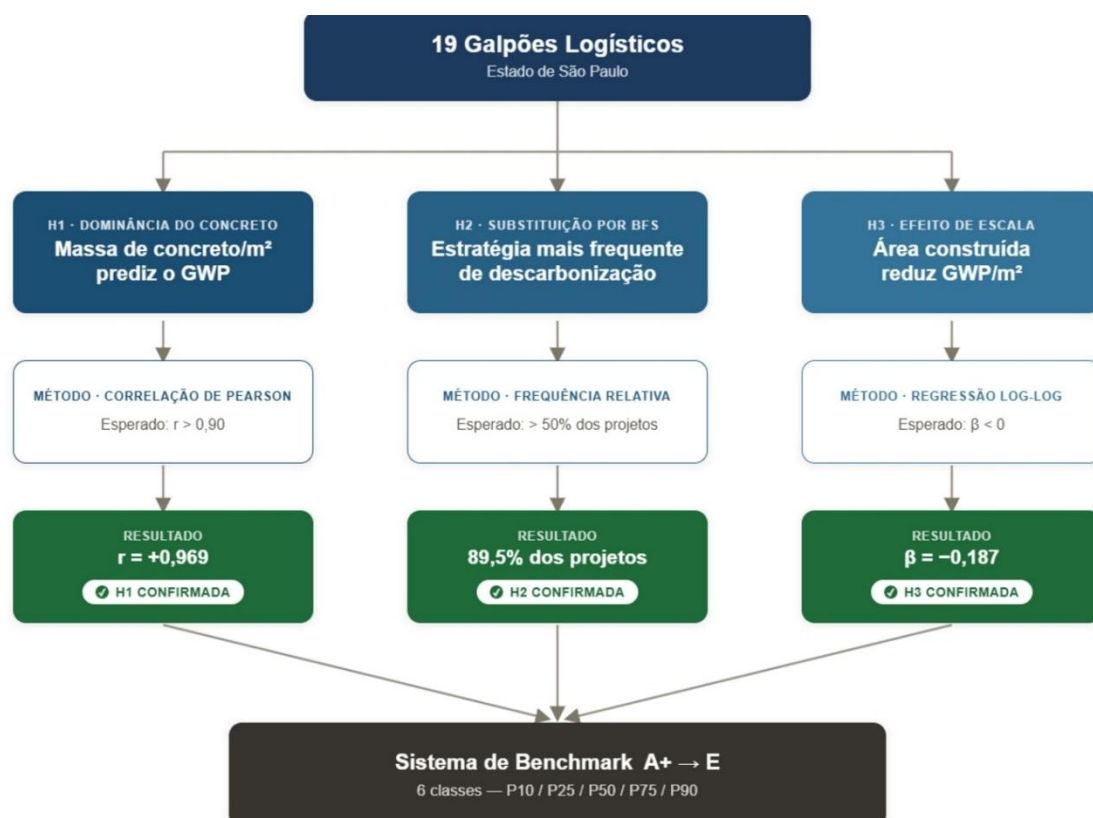
— e não a eficiência intrínseca do material — o fator determinante da variação observada.

H2 — Predominância da substituição de cimento Portland por BFS como estratégia de descarbonização. A substituição parcial do cimento Portland por cimento com escória granulada de alto-forno (BFS) é responsável pela maior parte das reduções de GWP verificadas nos projetos com *Design Final* otimizado, com contribuição proveniente do concreto superior a 90% das reduções totais e razão de impacto Concreto/Aço nas reduções superior a 4:1. Essa hipótese sustenta-se na análise dos cenários de redução disponíveis na base de dados.

H3 — Existência de efeito de escala na intensidade de carbono. Galpões com maior área construída apresentam, em média, menor GWP por metro quadrado, refletindo um efeito de diluição de materiais de alta intensidade carbônica — especialmente fundações e lajes de piso industrial — ao longo de maiores superfícies construídas. Espera-se que a elasticidade estimada por regressão log-log seja negativa, estatisticamente significativa e de magnitude próxima a $-0,20$.

A verificação dessas hipóteses é realizada por análise estatística descritiva e inferencial, cujos procedimentos são detalhados no Capítulo 3. A Figura 3 sintetiza graficamente as três hipóteses de pesquisa, os métodos de verificação empregados e os resultados obtidos.

Figura 3 – Diagrama conceitual das hipóteses de pesquisa e seus resultados



1.7 Delimitação do estudo

Para assegurar rigor metodológico e delimitar adequadamente o escopo da investigação, explicita-se a seguir o que este trabalho analisa e o que está além de seu alcance.

- **Delimitação geográfica:** O estudo restringe-se a galpões logísticos situados no Estado de São Paulo, Brasil. A amostra abrange 19 galpões logísticos distribuídos em municípios da Região Metropolitana de São Paulo e do interior do estado. Os *benchmarks* propostos têm validade direta para esse contexto; sua aplicabilidade a outras unidades federativas requer estudos adicionais que considerem as especificidades regionais da indústria de materiais e das práticas construtivas locais.
- **Delimitação tipológica:** A análise restringe-se a galpões logísticos de uso industrial-armazenagem, excluindo edifícios residenciais, comerciais, de saúde ou de outros usos. As características estruturais desta tipologia — lajes de piso industrial, sistemas de fundação profunda, estruturas de grande vão e baixa proporção de vedações externas — determinam um perfil de uso de materiais suficientemente específico para justificar o tratamento isolado em relação a outras tipologias construtivas.
- **Delimitação do escopo do ciclo de vida:** A análise contempla os módulos A1–A3 (fabricação e produção de materiais), A4 (transporte até o canteiro), B4 (reposição de materiais durante a vida útil), C1 (desconstrução), C2 (transporte de resíduos de demolição) e C4 (disposição final dos resíduos), conforme a norma EN 15978:2011. Os módulos A5, B1–B3, B5–B7, C3 e D são classificados como Módulo Não Avaliado (MNA), em conformidade com a prática declarada nos estudos originais. Em particular, o módulo D — que reflete o potencial de reutilização ou reciclagem além das fronteiras do sistema — é excluído em razão das incertezas associadas à sua estimativa e das reconhecidas limitações das bases de dados disponíveis para o contexto brasileiro.
- **Delimitação temporal:** Os 19 estudos de ACV foram concluídos em 2024, com período de referência de 60 anos (RSP — *Reference Service Period*), conforme declarado uniformemente em todos os relatórios individuais.

- **Delimitação instrumental e metodológica:** Todos os estudos foram executados com a ferramenta eTool, utilizando o método de caracterização CML-IA *Baseline* V4.5. A homogeneidade instrumental é, simultaneamente, uma limitação — os resultados refletem as escolhas metodológicas específicas dessa ferramenta e de sua base de dados — e um ponto forte da amostra, pois elimina a variabilidade artificial associada ao uso de diferentes softwares ou inventários.
- **O que este estudo não aborda:** Estão fora do escopo desta investigação: (a) emissões operacionais de carbono, decorrentes do consumo de energia e água durante o uso do edifício; (b) análise de custo do ciclo de vida (*life cycle cost*); (c) outros indicadores ambientais além do GWP, como potencial de acidificação, eutrofização ou consumo de recursos abióticos; e (d) projetos cujos estudos de ACV não integrem a amostra analisada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A produção científica que ancora este trabalho distribui-se por três campos do conhecimento que, embora relativamente autônomos, convergem na pergunta de pesquisa proposta. A metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida, o debate sobre o carbono incorporado em edifícios não residenciais e a química dos materiais cimentícios suplementares constituem os três eixos desta revisão.

2.1 Avaliação do Ciclo de Vida aplicada a edificações

2.1.1 Fundamentos e estrutura normativa

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia sistematizada para quantificar os impactos ambientais associados a um produto, processo ou serviço ao longo de todas as etapas de sua existência — da extração das matérias-primas à disposição final, passando pela fabricação, transporte, uso e manutenção. Essa abordagem, frequentemente sintetizada pela expressão "do berço ao túmulo" (*cradle to grave*), parte do pressuposto de que avaliar apenas uma etapa isolada do ciclo produtivo conduz a conclusões parciais e potencialmente enganosas sobre o real desempenho ambiental de um bem (Baumann; Tillman, 2004).

A estrutura metodológica da ACV é regulamentada internacionalmente pelas normas da família ISO 14040. A norma ISO 14040:2006 — adotada no Brasil como NBR ISO 14040 (ABNT, 2009) — estabelece os princípios e o arcabouço conceitual da metodologia, fixando os requisitos para a definição de objetivo e escopo, a análise de inventário e a avaliação dos impactos (ABNT, 2009a). A norma ISO 14044:2006 — correspondente à NBR ISO 14044 (ABNT, 2006) — complementa a anterior com orientações detalhadas sobre a condução de cada fase, os procedimentos de alocação de fluxos entre coprodutos, os critérios de corte e as exigências para revisão crítica independente dos estudos (ABNT, 2009b).

No contexto específico das edificações, a norma europeia EN 15978:2011 — *Sustainability of Construction Works: Assessment of Environmental Performance of Buildings* — sistematizou a aplicação da ACV ao ambiente construído, definindo a estrutura modular do ciclo de vida, o período de referência do estudo (*Reference Service Period*), as condições de declaração de resultados e os requisitos de escopo para estudos comparáveis (CEN, 2011). Embora não tenha correspondência formal no catálogo normativo da ABNT, a EN 15978:2011 é amplamente adotada como referência metodológica internacional em estudos de ACV de edificações, incluindo os desenvolvidos no contexto brasileiro, e constitui o marco regulatório que orienta os 19 estudos analisados nesta pesquisa.

2.1.2 As quatro fases da ACV e os módulos do ciclo de vida

A ISO 14040:2009 estrutura a ACV em quatro fases interdependentes e iterativas. A definição de objetivo e escopo estabelece o propósito do estudo, a unidade funcional, as fronteiras do sistema, os requisitos de qualidade dos dados e os procedimentos de comparação e revisão. A análise de inventário do ciclo de vida (ICV ou LCI) consiste na coleta e modelagem dos fluxos de materiais, energia e emissões associados ao sistema analisado. A avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV ou LCIA) converte os dados do inventário em indicadores de impacto ambiental por meio de métodos de caracterização. A interpretação, por fim, integra os resultados das fases anteriores para apoiar conclusões e recomendações consistentes com o objetivo declarado (ABNT, 2009a).

Para edificações, a EN 15978:2011 organiza o ciclo de vida em quatro grandes estágios — produto, construção, uso e fim de vida —, subdivididos em módulos alfanuméricos.

Os módulos A1–A3 cobrem a produção dos materiais de construção, da extração das matérias-primas (A1) ao processamento e fabricação (A3), etapa comumente referida como *cradle-to-gate*.

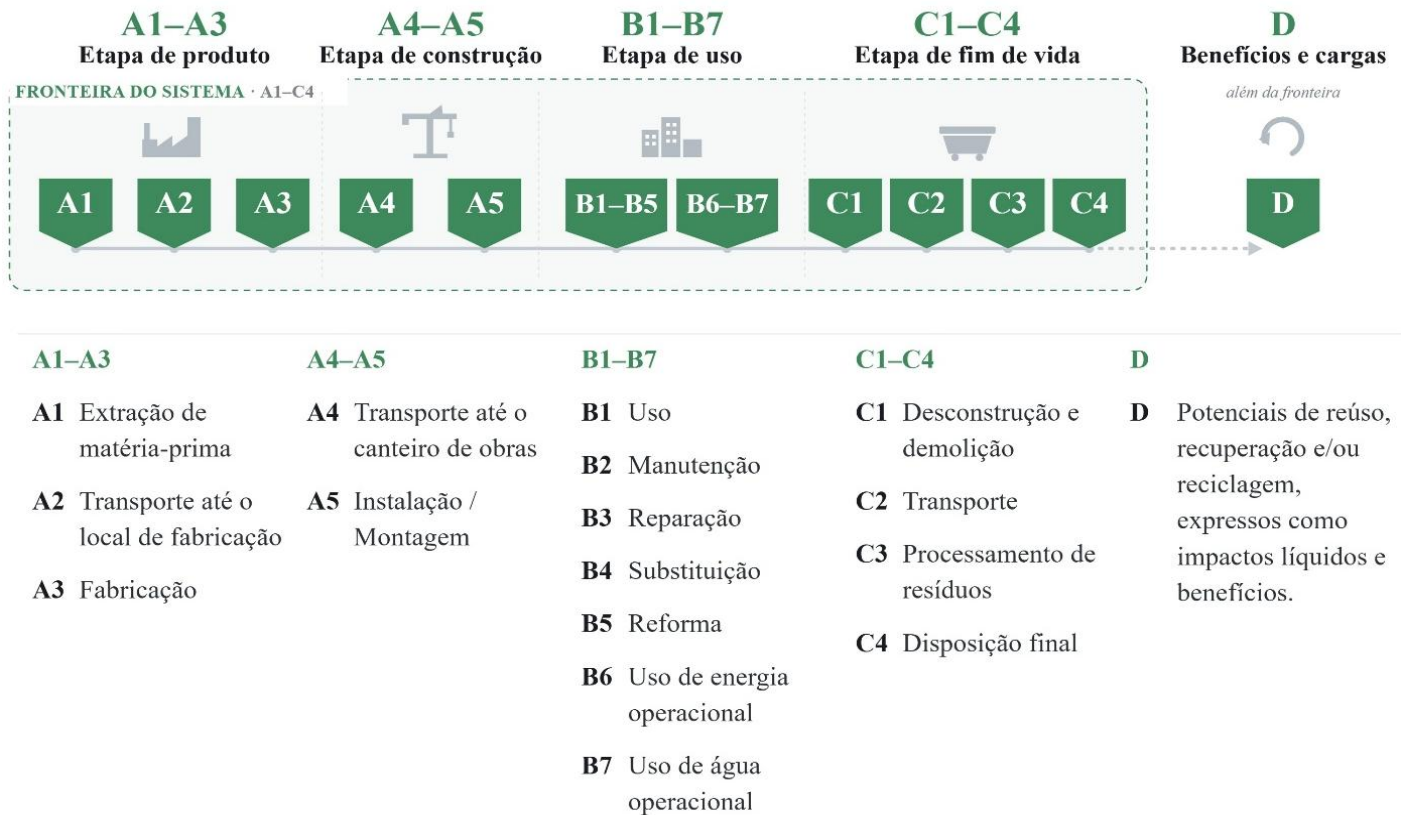
O módulo A4 abrange o transporte dos materiais ao canteiro de obras; o A5, as atividades no próprio canteiro (montagem, resíduos de construção).

No estágio de uso, os módulos B1 a B7 cobrem desde o desempenho em uso (B1) até a manutenção (B2), reparos (B3), reposição de componentes (B4), reforma (B5) e os consumos de energia (B6) e água (B7) durante a operação.

Os módulos C1 a C4 compreendem as etapas de fim de vida: desconstrução (C1), transporte de resíduos (C2), processamento para reuso ou reciclagem (C3) e disposição final (C4).

O módulo D, situado além das fronteiras do sistema (*beyond system boundary*), reflete o potencial líquido de benefícios ou cargas decorrentes da reciclagem e reutilização de materiais após o encerramento do ciclo de vida do edifício (CEN, 2011).

Figura 4 – Representação das etapas do ciclo de vida de produtos e edificações conforme módulos A–D



Fonte: Elaborado pelo autor. (2026)

Em estudos de ACV de edificações, é prática aceita declarar como Módulo Não Avaliado (MNA) aqueles módulos cujos dados de inventário são insuficientes, cujos impactos são considerados irrelevantes para a unidade funcional adotada, ou cuja inclusão comprometeria a comparabilidade entre estudos. Essa declaração explícita é requisito das normas ISO 14044:2006 e EN 15978:2011, e sua omissão invalida a comparabilidade dos resultados com outras referências bibliográficas.

2.1.3 O indicador GWP como métrica central da ACV de edificações

O método de caracterização traduz os dados do inventário em indicadores de impacto ambiental por meio de fatores de equivalência previamente estabelecidos. Dentre os métodos disponíveis, o *Centrum voor Milieukunde Leiden — Integrated Assessment* (CML-IA), desenvolvido pela Universidade de Leiden (Países Baixos), é amplamente utilizado em estudos de ACV de edificações por sua robustez metodológica e pela estabilidade de seus fatores de caracterização ao longo do tempo

(Guinée *et al.*, 2002). Na versão *Baseline* V4.5 — adotada nos estudos desta pesquisa —, o método cobre indicadores como potencial de aquecimento global, acidificação, eutrofização, formação de oxidantes fotoquímicos, depleção de recursos abióticos e depleção da camada de ozônio.

O indicador central desta investigação é o Potencial de Aquecimento Global (GWP — *Global Warming Potential*), expresso em quilogramas de dióxido de carbono equivalente por metro quadrado de área construída ($\text{kgCO}_2\text{e/m}^2$). O GWP agrega, em uma única métrica, as emissões de diferentes gases de efeito estufa — principalmente CO_2 , CH_4 e N_2O — ponderadas pelo seu potencial relativo de aquecimento em um horizonte de 100 anos, conforme os fatores estabelecidos pelo IPCC (IPCC, 2013, 2022). A expressão normalizada por metro quadrado de área construída permite a comparação de projetos com diferentes escalas, condição necessária para a construção de sistemas de *benchmarking*.

A escolha do GWP como indicador prioritário é sustentada por quatro razões complementares: (a) é o indicador mais diretamente relacionado às metas do Acordo de Paris e, por isso, o mais relevante do ponto de vista das políticas climáticas; (b) é aquele com maior disponibilidade e qualidade de dados nos bancos de inventário disponíveis; (c) é exigido pelos principais protocolos de construção sustentável — LEED, BREEAM, Level(s) — como métrica mandatória de ACV; e (d) permite comunicação direta com gestores e tomadores de decisão que não necessariamente dominam os fundamentos técnicos da metodologia (World Green Building Council, 2019; Royal Institution of Chartered Surveyors, 2023).

2.1.4 *Benchmarking* em ACV de edificações: conceitos e boas práticas

Um *benchmark* de desempenho ambiental baseado em ACV é uma referência estatisticamente derivada de uma amostra de projetos que permite comparar o desempenho de um edifício específico com a prática estabelecida em seu contexto geográfico, tipológico e metodológico (Röck *et al.*, 2020). Para ser metodologicamente válido, um *benchmark* de ACV deve ser construído a partir de amostras com alto grau de homogeneidade quanto ao método de cálculo, à ferramenta utilizada, ao escopo dos módulos avaliados, à unidade funcional e ao período de referência.

A heterogeneidade metodológica é, segundo a literatura, o principal obstáculo à comparabilidade de estudos de ACV entre si (Pomponi; Moncaster, 2016; Säynäjoki *et al.*, 2017). Diferenças nas escolhas dos módulos avaliados, nas bases de dados de inventário (genéricas versus específicas), nas ferramentas computacionais e nos métodos de caracterização podem gerar variações nos resultados que superam, em magnitude, as diferenças reais entre os próprios projetos analisados. Essa constatação motivou o desenvolvimento de iniciativas internacionais de padronização metodológica para *benchmarking*: o protocolo Level(s) da Comissão Europeia (European Commission, 2020), o guia Whole Life Carbon Assessment do RICS (Royal Institution of Chartered Surveyors, 2023), o *Embodied Carbon in Construction Calculator* (EC3) do *Building Transparency* (Building Transparency, 2019) e o Carbon Leadership Forum na América do Norte estabelecem requisitos mínimos de comparabilidade para a inclusão de estudos em bases de referência.

A homogeneidade metodológica da amostra desta pesquisa — mesma ferramenta, mesmo consultor e mesmo método de caracterização — constitui uma vantagem científica relevante. Adicionalmente, 15 dos 19 estudos contavam com revisão independente concluída pela Cerclos até o fechamento da pesquisa, enquanto os quatro estudos restantes são explicitamente tratados com ressalva nas análises em que essa condição afeta a interpretação dos resultados. Raramente as condições de um benchmark de ACV permitem isolar a variação do indicador ambiental das variações metodológicas; nesta amostra, as diferenças observadas no GWP/m² entre projetos podem ser atribuídas com maior confiança às decisões de projeto do que a inconsistências instrumentais.

2.2 Carbono incorporado em edifícios não residenciais

2.2.1 Conceito e crescente relevância do carbono incorporado

O carbono incorporado (*embodied carbon*) refere-se ao total de emissões de gases de efeito estufa associadas às etapas do ciclo de vida de um edifício que não incluem a sua operação — ou seja, à produção dos materiais, ao transporte, à construção, à manutenção, à demolição e ao descarte final (World Green Building Council, 2019). Esse conceito se distingue do carbono operacional, que corresponde às emissões decorrentes do consumo de energia e água durante o uso do edifício.

A relevância do carbono incorporado ganhou destaque crescente à medida que regulamentações mais rigorosas de eficiência energética reduziram progressivamente as emissões operacionais de novos edifícios. A dinâmica resultante — quanto mais eficiente energeticamente o edifício, maior a proporção das emissões totais atribuída ao carbono incorporado — está bem documentada na literatura: estima-se que, em edifícios projetados com eficiência energética superior à média de mercado, o carbono incorporado possa representar entre 50% e 80% das emissões totais do ciclo de vida (Röck *et al.*, 2020; Pomponi; Moncaster, 2016). Em tipologias com consumo operacional reduzido, como galpões logísticos sem sistemas de climatização intensiva, essa proporção tende a ser ainda mais expressiva.

O reconhecimento dessa dinâmica mobilizou, a partir da segunda metade dos anos 2010, um conjunto expressivo de iniciativas internacionais voltadas à quantificação e redução do carbono incorporado em edificações. O relatório *Bringing Embodied Carbon Upfront*, publicado pelo *World Green Building Council* em 2019, sintetizou o estado do conhecimento e lançou a meta de redução de 40% no carbono incorporado de novos edifícios até 2030, como caminho necessário para que o setor da construção contribua com as metas do Acordo de Paris (World Green Building Council, 2019). A produção científica sobre o tema cresceu em ritmo acelerado na mesma década, com expressivo aumento no número de estudos de ACV de edificações publicados em periódicos indexados (Röck *et al.*, 2020).

2.2.2 Estado da arte internacional em carbono incorporado de edificações

Uma revisão sistemática da literatura conduzida por Röck *et al.* (2020) — uma das mais abrangentes disponíveis, com análise de mais de 650 estudos de ACV de edificações publicados entre 1995 e 2018 — identificou que o carbono incorporado mediano de edifícios novos em países de alta renda situa-se na faixa de 400 a 600 kgCO₂e/m², com ampla variação em função do uso (residencial, comercial, industrial), do sistema estrutural, da localização geográfica e do escopo metodológico adotado (Röck *et al.*, 2020). O mesmo estudo confirmou que o módulo A1–A3 — fabricação dos materiais — responde pela maior parcela do GWP incorporado na maioria das tipologias, com participação que varia entre 60% e 90% do total, dependendo do escopo avaliado.

Para edifícios industriais e de armazenagem, os estudos disponíveis na literatura são menos numerosos do que aqueles voltados a edifícios residenciais ou de escritórios, mas indicam que o GWP incorporado depende fortemente das soluções estruturais adotadas, da configuração dos vãos, da intensidade de uso de materiais e das características da subestrutura e do piso industrial. Em estudo de *benchmarking* com edifícios do Reino Unido, Collings (2020) observou ampla variação nos resultados de carbono incorporado, associada a diferenças de tipologia, área, custo, altura e configuração estrutural, indicando valores da ordem de 200 a 600 kgCO₂e/m² para estruturas de edifícios simples e padronizados e de 400 a 800 kgCO₂e/m² para o edifício completo, considerando o escopo de carbono até a conclusão da construção. De modo complementar, *benchmarks* europeus baseados na metodologia EN 15978:2011 indicam que edifícios industriais e armazéns compõem uma categoria específica de análise, com resultados sensíveis às diferenças regionais, aos sistemas construtivos e ao escopo de elementos incluídos na modelagem (One Click LCA, 2021).

No contexto específico de empreendimentos logísticos europeus, relatórios corporativos recentes também evidenciam a adoção de metas e métricas de carbono incorporado em kgCO₂e/m². A SEGRO (2024), por exemplo, reportou intensidade média de carbono incorporado de 318 kgCO₂e/m² em seus empreendimentos entregues em 2024, enquanto a Tritax Big Box (2024) estabeleceu meta de 400 kgCO₂e/m² para o carbono incorporado inicial de novos desenvolvimentos, reportando desempenho de 286,8 kgCO₂e/m² para edifícios e 412 kgCO₂e/m² quando considerado o site completo. Esses valores reforçam que galpões logísticos e edifícios industriais apresentam perfis de carbono incorporado próprios, influenciados pela escala construtiva, pelo sistema estrutural e pela composição dos elementos de maior massa material.

Em galpões com maior proporção de concreto, especialmente aqueles com fundações profundas em solos de baixa capacidade de suporte e lajes de piso industrial de grande espessura, a intensidade de carbono tende a se elevar em função do aumento direto do volume de concreto e aço incorporado à subestrutura e ao piso. Essa interpretação é coerente com estudos estruturais que apontam a relevância das lajes, vigas, pilares e fundações na composição do carbono incorporado, bem como com a sensibilidade dos resultados às configurações estruturais e aos vãos adotados

(Collings, 2020; The Concrete Centre, 2021; The Institution of Structural Engineers, 2022).

Um achado recorrente nesses estudos internacionais, e amplamente confirmado pela literatura de revisão, é a determinação do quantitativo de concreto como preditor da intensidade de carbono incorporado em tipologias industriais e de armazenagem.

2.2.4 O mercado de galpões logísticos no Brasil e em São Paulo

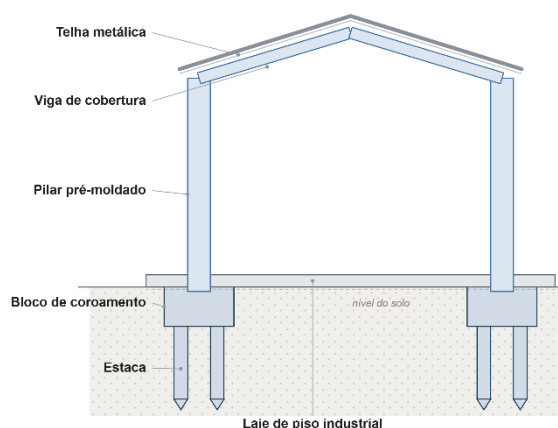
O segmento de galpões logísticos no Brasil passou por transformação expressiva nas últimas duas décadas, impulsionado por fatores estruturais como a expansão do comércio eletrônico, a modernização das cadeias de suprimentos de grandes varejistas e a crescente demanda por infraestrutura de armazenagem estrategicamente posicionada em relação a eixos viários e centros de consumo. Esse movimento foi acompanhado pelo crescimento do estoque nacional de condomínios logísticos, que alcançou 27,8 milhões de m² em 2024, e pela intensificação da participação de operadores, incorporadores e investidores institucionais no desenvolvimento de ativos logísticos de alto padrão. A consolidação de fundos de investimento imobiliário especializados no segmento logístico, particularmente em galpões Classe A, também contribuiu para acelerar o desenvolvimento de empreendimentos com especificações técnicas superiores, maior padronização construtiva e crescente incorporação de critérios ESG e certificações ambientais, como LEED e AQUA-HQE (Colliers, 2025; JLL, 2025; Fernandes; Shimbo, 2024; Green Building Council Brasil, 2024; Fundação Carlos Alberto Vanzolini, [2026]).

O Estado de São Paulo concentra a maior parcela do estoque de galpões logísticos modernos no Brasil, com estoque logístico multilocatário estimado em aproximadamente 212 milhões de pés quadrados, equivalentes a cerca de 19,7 milhões de m². Essa concentração distribui-se principalmente nos corredores logísticos que irradiam a partir da Região Metropolitana de São Paulo, com destaque para os eixos das rodovias Anhanguera/Bandeirantes, Castello Branco, Dutra, Raposo Tavares e Régis Bittencourt, além das conexões proporcionadas pelo Rodoanel Mário Covas. Tal configuração reflete tanto a proximidade com o maior mercado consumidor do país quanto a disponibilidade de infraestrutura viária, mão de obra especializada e

acesso estratégico a centros de distribuição, portos, aeroportos e polos industriais (CBRE, 2024; SiLA, [2024?]; BRASIL, 2015).

Do ponto de vista construtivo, galpões logísticos de alto padrão — frequentemente denominados Classe A ou A+ em relatórios de mercado — compartilham características que os diferenciam de outras tipologias não residenciais, como elevado pé-direito livre, grandes áreas contínuas de piso industrial, estruturas concebidas para reduzir interferências internas e sistemas de cobertura capazes de vencer grandes vãos (CBRE, 2024; Colliers, 2025; JLL Brasil, 2024). O piso industrial desses empreendimentos deve atender a solicitações associadas ao armazenamento, à circulação de empilhadeiras e à operação de sistemas porta-paletes, exigindo critérios específicos de desempenho, planicidade, resistência e durabilidade (American Concrete Institute, 2010; The Concrete Society, 2013). As fundações, por sua vez, são dimensionadas conforme as ações transmitidas pela superestrutura e as condições geotécnicas locais, de acordo com os critérios estabelecidos para projeto e execução de fundações (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019).

Figura 5 - Anatomia de um galpão Logístico



Fonte: Elaborado pelo autor. (2026)

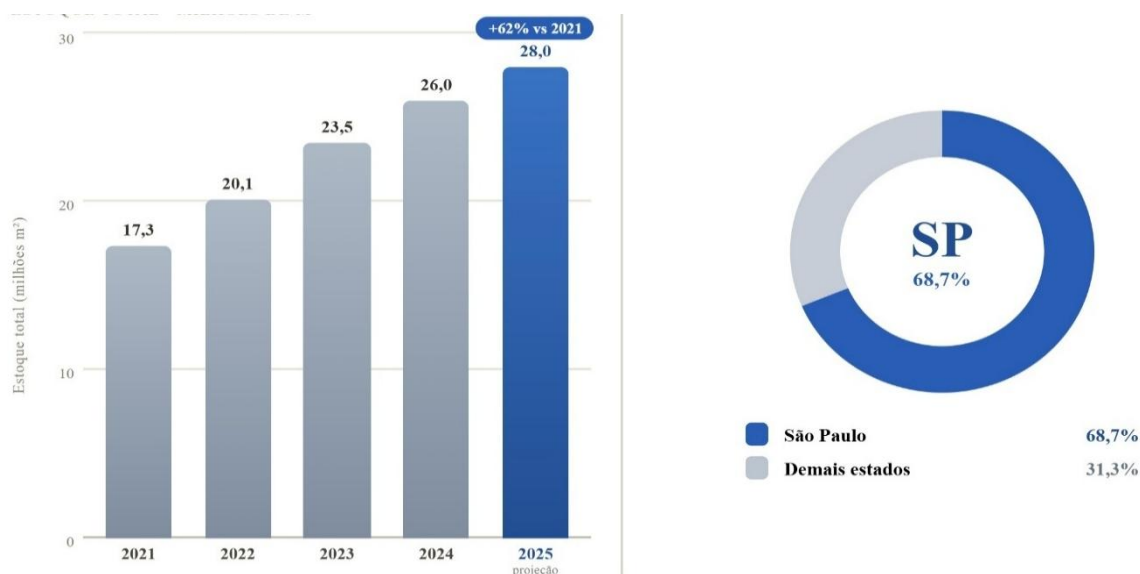
Essas características determinam um perfil de uso de materiais bastante específico: alta concentração de concreto em fundações profundas (blocos de coroamento, estacas), laje de piso industrial e estrutura pré-moldada, combinada com uma quantidade menor de aço por m^2 de área construída do que seria típico de uma estrutura metálica leve. Como consequência direta, o carbono incorporado desses

edifícios é fortemente influenciado pelas decisões de projeto relativas ao sistema de fundação, à espessura e ao traço da laje de piso e ao tipo de cimento utilizado — fatores que esta pesquisa analisa quantitativamente no Capítulo 4.

A Figura 6 contextualiza a relevância e o dinamismo do segmento de galpões logísticos de alto padrão no Brasil, com destaque para o Estado de São Paulo:

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Cushman & Wakefield (2025) e Revista Buildings (2024).

Figura 6 – Evolução do estoque nacional de galpões logísticos (2021–2025) e absorção líquida em São Paulo



2.3 Materiais cimentícios e estratégias de descarbonização

2.3.1 O cimento Portland e sua contribuição ao carbono incorporado

O cimento Portland é o material de construção com o maior volume de produção global e, simultaneamente, um dos mais intensivos em carbono de toda a cadeia produtiva da construção civil. A produção de uma tonelada de clínquer Portland — o componente reativo principal que determina as propriedades ligantes do cimento — gera aproximadamente 0,83 tonelada de CO₂, com origem em duas fontes principais: a decomposição do calcário durante a clínquerização ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$), que responde por cerca de 60% das emissões, e o consumo de combustíveis para atingir as temperaturas de sinterização (acima de 1.450°C), que explica os 40% restantes (International Energy Agency, 2022; Taylor *et al.*, 2006; Worrell *et al.*, 2001). No total, a indústria cimenteira é responsável por aproximadamente 7% a 8% das

emissões globais de CO₂, tornando-a um dos setores industriais com maior desafio de descarbonização (IPCC, 2022; International Energy Agency, 2022).

No Brasil, a produção de cimento é regulamentada pela NBR 16697 (ABNT, 2018), que define as diferentes classes de cimento Portland disponíveis no mercado nacional. As classes mais relevantes para aplicações em galpões logísticos incluem o CP II-E (cimento composto com escória, com 6% a 34% de escória em massa), o CP III (cimento de alto-forno, com 35% a 70% de escória), o CP II-F (composto com filer calcário, 3% a 10%) e o CP V-ARI (de alta resistência inicial, sem adições) (ABNT, 2018). A intensidade carbônica média do cimento brasileiro situa-se em torno de 564 kgCO₂e/tonelada (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, 2019), valor que reflete o mix de compostos comercializados e os combustíveis utilizados na produção nacional.

Para o concreto — resultante da combinação de cimento, agregados, água e, eventualmente, aditivos —, a intensidade carbônica depende fundamentalmente do teor de clínquer por metro cúbico, que é função direta do traço (consumo de cimento e relação água/cimento) e da classe de resistência à compressão (fck). Concretos estruturais de resistência típica para galpões logísticos (fck entre 25 e 35 MPa) apresentam intensidades carbônicas da ordem de 200 a 350 kgCO₂e/m³, equivalentes a 60 a 120 kgCO₂e por tonelada de concreto, conforme o tipo de cimento e as especificações do traço (Habert *et al.*, 2011; eTool Pty Ltd, 2024).

2.3.2 Materiais cimentícios suplementares

Os materiais cimentícios suplementares (MCS) — na literatura inglesa, *supplementary cementitious materials* (SCMs) — são substâncias que, quando finamente moídas ou processadas e combinadas com o cimento Portland, participam das reações de hidratação e contribuem para o desenvolvimento das propriedades do concreto, com a vantagem de apresentar intensidade carbônica significativamente inferior à do clínquer Portland (Mehta; Monteiro, 2014; Lothenbach *et al.*, 2011).

Os principais MCS utilizados na construção civil são:

- a) Escória granulada de alto-forno (GGBS — *Ground Granulated Blast-Furnace Slag*, designada neste trabalho pela sigla BFS): subproduto da produção de

ferro-gusa em altos-fornos siderúrgicos; apresenta propriedades cimentícias latentes ativadas em meio alcalino;

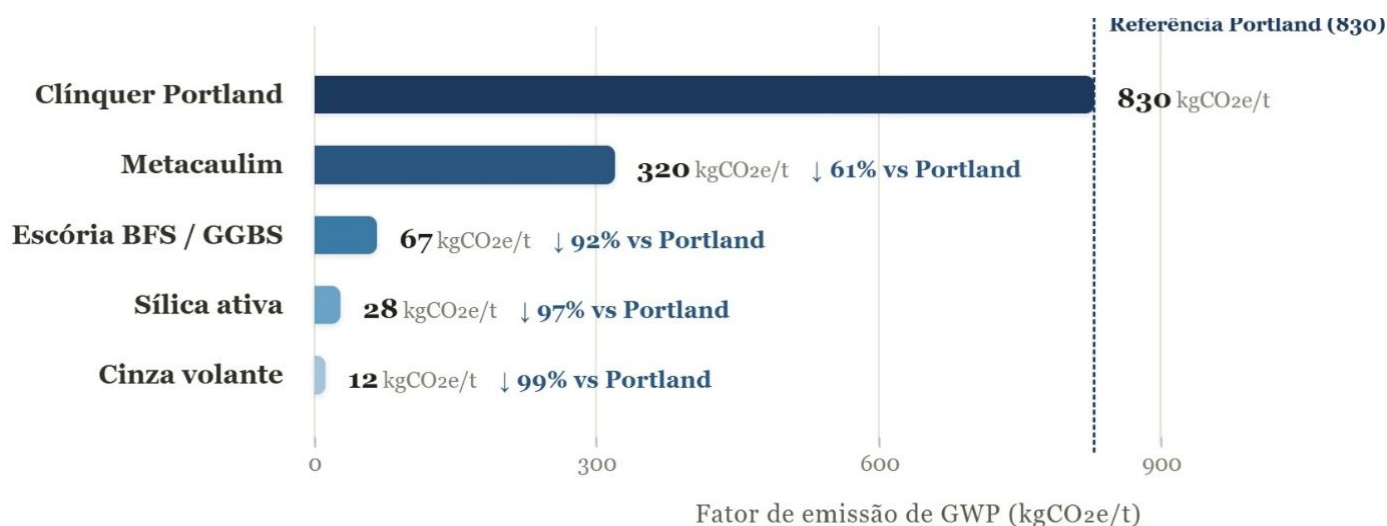
- b) Cinza volante (*fly ash*): subproduto da combustão de carvão mineral em usinas termelétricas; apresenta propriedades pozolânicas, com reatividade dependente do teor de silício reativo;
- c) Sílica ativa (*silica fume* ou *microsilica*): subproduto da produção de silício e ferrossilício; apresenta alta reatividade pozolânica por sua elevada superfície específica;
- d) Metacaulim: argila caulinítica calcinada; apresenta propriedades pozolânicas relevantes e é amplamente disponível em regiões sem acesso a subprodutos industriais das demais categorias.

A substituição de parte do clínquer Portland por materiais cimentícios suplementares (MCS), como a escória granulada de alto-forno moída (BFS/GGBS), reduz o fator clínquer do cimento e, conseqüentemente, as emissões associadas à fabricação do ligante, uma vez que a produção de clínquer concentra parcela significativa das emissões do cimento, decorrentes principalmente da calcinação do calcário e da queima de combustíveis no forno (International Energy Agency; Cement Sustainability Initiative, 2018; Antunes *et al.*, 2022). Em abordagens de ACV que tratam a BFS/GGBS como subproduto da siderurgia com baixa carga ambiental atribuída, sua intensidade carbônica pode ser significativamente inferior à do clínquer Portland; entretanto, o valor específico depende do método de alocação adotado, do processamento e do transporte (Li *et al.*, 2016; Saade; Silva; Silva, 2012).

A literatura reporta emissões de aproximadamente 0,83 tCO₂ por tonelada de clínquer, enquanto a utilização de MCS é reconhecida como uma das principais estratégias para redução do fator clínquer e mitigação das emissões do cimento (Lothenbach; Scrivener; Hooton, 2011; Antunes *et al.*, 2022). Assim, a substituição de clínquer por BFS/GGBS pode gerar reduções expressivas nas emissões associadas ao componente cimentício substituído, podendo superar 90% quando adotados fatores de emissão residuais ou de baixa alocação para a escória. Contudo, a quantificação desse benefício deve ser interpretada com cautela, pois a alocação de impactos ambientais entre o aço e seus coprodutos constitui uma escolha metodológica relevante em estudos de ACV (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009; Li *et al.*, 2016; Saade; Silva; Silva, 2012).

A Figura 7 ilustra a diferença expressiva entre os fatores de emissão do clínquer Portland e dos principais materiais cimentícios suplementares (MCS), fundamentando a vantagem ambiental das estratégias de substituição:

Figura 7 – Fator de emissão de GWP dos principais materiais cimentícios suplementares em relação ao clínquer Portland



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Jones (2019) — ICE Database v3.0 — e Habert et al. (2020).

2.3.3 BFS em fundações e pisos industriais de galpões logísticos

A aplicação de BFS em galpões logísticos concentra-se, conforme a literatura e os dados desta pesquisa, em dois sistemas construtivos de alta participação no GWP total: as fundações profundas — especialmente os blocos de coroamento de estacas e as vigas de travamento — e a laje de piso industrial.

Fundações. Em solos de baixa capacidade de suporte, galpões logísticos de grande porte frequentemente recorrem a fundações profundas, tais como estacas pré-moldadas de concreto, estacas hélice contínua monitorada ou estacas escavadas, sobre as quais se apoiam blocos de coroamento de concreto armado e vigas de baldrame. A escolha do tipo de fundação depende das características geotécnicas do terreno, das cargas transmitidas pela estrutura e dos critérios de desempenho estabelecidos em projeto, conforme as diretrizes aplicáveis ao projeto e à execução de fundações (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019; Associação Brasileira de Empresas de Engenharia de Fundações e Geotecnia, 1999).

Em galpões de grande área, esses elementos podem representar parcela significativa do volume total de concreto da edificação, especialmente quando há

necessidade de fundações profundas, blocos robustos e vigas de travamento. Pelo elevado consumo de concreto e pela adequação técnica em elementos de grande volume, os blocos de fundação constituem aplicação potencial para concretos com escória granulada de alto-forno moída (BFS/GGBS), em razão de propriedades como menor calor de hidratação, menor permeabilidade e melhor desempenho frente a determinados ambientes agressivos, desde que respeitados os requisitos de dosagem, resistência, durabilidade e controle tecnológico do concreto (American Concrete Institute, 2017; Mehta; Monteiro, 2014).

Piso industrial. A laje de piso industrial de galpões logísticos é tipicamente concebida como laje de concreto apoiada sobre o solo compactado ou sobre sub-base granular, dimensionada em função das cargas de operação, do tráfego de empilhadeiras, das cargas de porta-paletes, das propriedades do subleito, da geometria das juntas e dos requisitos de planicidade e nivelamento. Em empreendimentos logísticos de grande área, o piso industrial tende a constituir um dos principais consumidores de concreto da edificação, podendo representar parcela expressiva do carbono incorporado total.

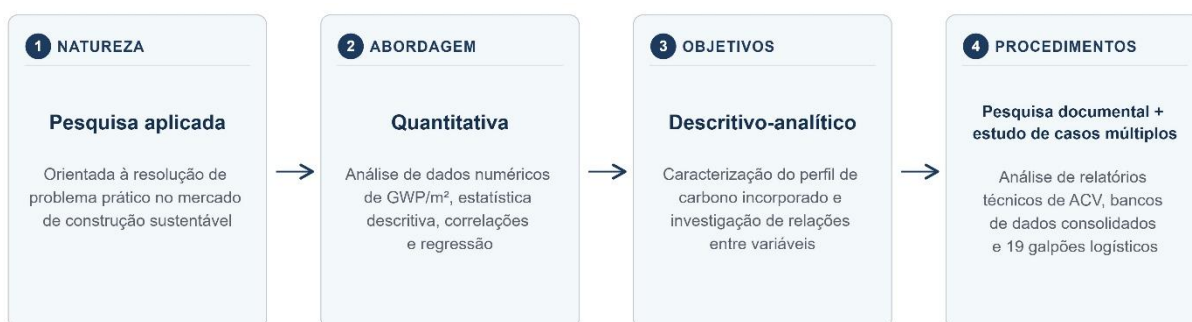
A substituição parcial de cimento Portland por BFS/GGBS no traço do concreto do piso industrial, em teores compatíveis com os requisitos de desempenho especificados, é tecnicamente viável e pode contribuir para a redução do GWP do concreto, além de favorecer propriedades de durabilidade associadas à redução da permeabilidade e à resistência à penetração de agentes agressivos. Contudo, sua aplicação exige controle rigoroso da dosagem, do tempo de pega, do desenvolvimento de resistência, da cura, da compatibilidade com aditivos e das condições de acabamento superficial, especialmente em pisos sujeitos a tráfego intenso e elevados requisitos de desempenho operacional (American Concrete Institute, 2010; American Concrete Institute, 2017; The Concrete Society, 2013; Mehta; Monteiro, 2014).

3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve as escolhas metodológicas que orientaram a investigação — do delineamento científico adotado à descrição da amostra, passando pelos procedimentos de coleta e validação dos dados, pelo escopo do ciclo de vida avaliado, pela ferramenta computacional e pelo método de caracterização empregados, pelos procedimentos de análise estatística e pelas decisões que sustentam a proposta de *benchmark*. A seção final dedica atenção explícita às limitações que condicionam a interpretação responsável dos resultados.

A Figura 8 ilustra o delineamento metodológico da pesquisa.

Figura 8 – Delineamento metodológico da pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor. (2026)

3.1 Caracterização da pesquisa

Quanto à sua natureza, este trabalho configura-se como pesquisa aplicada: seus resultados — em especial o sistema de *benchmark* proposto — são orientados à resolução de um problema prático identificado no contexto do mercado de construção sustentável brasileiro, a saber, a ausência de referências de desempenho em carbono incorporado calibradas para galpões logísticos no Estado de São Paulo (Gil, 2017).

Quanto à abordagem, a pesquisa é quantitativa. O objeto central de análise são dados numéricos de GWP/m² extraídos de estudos de ACV de projetos reais, e o tratamento dos dados envolve procedimentos formais de estatística descritiva, análise de correlação e modelagem de regressão. A natureza inteiramente replicável dos procedimentos — baseados em registros documentados e bancos de dados estruturados, sem instrumentos de coleta subjetivos — reforça esse enquadramento (Creswell, 2010).

Quanto aos objetivos, a pesquisa combina caráter descritivo e analítico. É descritiva porque caracteriza sistematicamente o perfil de carbono incorporado de uma amostra de galpões logísticos — distribuições, medidas de tendência central e dispersão, e a contribuição proporcional de cada módulo e material para o GWP total. É analítica porque vai além da descrição: investiga relações entre variáveis observadas, testa hipóteses de associação estatística e busca identificar os fatores que melhor explicam a variação do indicador entre os projetos analisados (Gil, 2017; Marconi; Lakatos, 2017).

Quanto aos procedimentos técnicos, a pesquisa articula elementos de pesquisa documental e de estudo de casos múltiplos (Yin, 2015). É documental porque os dados provêm de fontes consolidadas preexistentes — relatórios técnicos de ACV e arquivos de exportação de ferramenta computacional especializada —, sem coleta de campo primária pelo pesquisador. É de casos múltiplos porque examina 19 projetos individuais com o objetivo de identificar padrões, variações e regularidades que, agregados, permitam formular generalizações analíticas sobre a tipologia de galpões logísticos paulistas.

3.2 Descrição da amostra

3.2.1 Composição e critérios de inclusão

A amostra é composta por 19 galpões logísticos pertencentes a 9 empreendimentos localizados no Estado de São Paulo, Brasil, cujos estudos de ACV foram concluídos no ano de 2024. A formação da amostra não resultou de procedimento amostral probabilístico — não existe um universo finito e conhecido de estudos de ACV de galpões logísticos paulistas do qual selecionar aleatoriamente —, mas da disponibilidade de um conjunto homogêneo de estudos previamente desenvolvidos por um mesmo consultor especializado, para um mesmo tipo de edificação, com revisão independente concluída em 15 dos 19 estudos até o fechamento desta pesquisa. Trata-se, portanto, de uma amostra por conveniência com alta homogeneidade metodológica — condição que, como discutido no Capítulo 2, é requisito central para a validade de *benchmarks* baseados em ACV (Röck *et al.*, 2020). Os critérios que definem a elegibilidade de um estudo para inclusão na amostra são:

- a) disponibilidade de estudo de ACV completo, contemplando os cenários *Baseline* e *Design Final*, realizado com a ferramenta *eTool*;
- b) execução do estudo pelo mesmo consultor (CTE — Centro de Tecnologia de Edificações), garantindo homogeneidade nos procedimentos de modelagem, de coleta de dados e de declaração de escopo;
- c) pertencimento à tipologia de galpões logísticos de uso industrial-armazenagem, situados no Estado de São Paulo.

Todos os 19 estudos satisfazem os critérios (a), (b) e (c).

3.2.2 Características gerais da amostra

Os 19 galpões (Tabela 1) distribuem-se por 9 empreendimentos localizados em municípios da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e do interior do Estado, com concentração em corredores logísticos próximos a rodovias estratégicas.

Tabela 1 – Empreendimentos e número de galpões integrantes da amostra.

Empreendimento	Localização	Galpões (n)	Galpões identificados
E01	Mauá, RMSP	2	E01-G1, E01-G2
E02	Itapeverica da Serra	3	E02-G1, E02-G2, E02-G3
E03	Cabreúva, SP	1	E03-G1
E04	Guarulhos, RMSP	4	E04-G1, E04-G2, E04-G3, E04-G4
E05	Barueri, RMSP	1	E05-G1
E06	Guarulhos, RMSP	2	E06-G1, E06-G2
E07	São Paulo	2	E07-G1, E07-G2
E08	Cajamar	1	E08-G1
E09	Guarulhos, RMSP	3	E09-G1, E09-G2, E09-G3
Total		19	

Fonte: Elaborado pelo autor. (2026)

Do ponto de vista da escala construtiva, a amostra abrange um espectro expressivamente amplo: as áreas brutas construídas (GFA eTool) variam entre 4.376 m² e 173.436 m², e os pés-direitos livres entre 10,0 m e 17,3 m. Essa variação de escala é um elemento central para a investigação do efeito de escala sobre o GWP/m², desenvolvida no Capítulo 4 por meio de regressão log-log.

Todos os 19 galpões foram avaliados em dois cenários:

- *Baseline (Business as Usual)*: projeto convencional, com materiais e especificações padrão de mercado e sem aplicação de estratégias específicas de descarbonização. Representa o ponto de referência da prática corrente no setor;
- *Design Final*: projeto otimizado, incorporando estratégias de redução de carbono incorporado — principalmente a substituição parcial de cimento Portland por cimento com escória de alto-forno (BFS) —, mantidas integralmente as demais especificações de desempenho estrutural e funcional.

A comparação entre os dois cenários permite quantificar o potencial de redução de GWP atribuível às estratégias de descarbonização adotadas, com base de comparação uniforme entre projetos.

3.3 Fontes e coleta de dados

3.3.1 Documentos primários

Os dados analisados nesta pesquisa originam-se de documentos produzidos no âmbito dos próprios estudos de ACV, organizados em duas categorias:

Relatórios técnicos de ACV (formato PDF). Para cada um dos 19 galpões, existem pelo menos dois relatórios PDF gerados pela ferramenta *eTool*: um para o cenário *Baseline* e outro para o *Design Final*. Em alguns empreendimentos, há documentos adicionais — relatórios de cenários intermediários e pareceres de revisão independente (*Certifier Review Statement*). No total, a biblioteca documental primária compreende 43 arquivos PDF de ACV. Esses relatórios contêm: a declaração formal de escopo (unidade funcional, RSP, módulos avaliados e Módulo Não Avaliado), os resultados de impacto por módulo do ciclo de vida (*LCIA Summary Table*), o inventário detalhado por material com os respectivos valores de GWP, e as observações e ressalvas do revisor independente.

Arquivos de exportação XLSX (*All Impact Details*). Para cada estudo, a ferramenta *eTool* gera um arquivo de exportação em formato Microsoft Excel contendo o inventário completo de materiais com os valores de GWP e demais indicadores ambientais, desagregados por módulo do ciclo de vida. Esses arquivos constituem a fonte primária dos dados quantitativos em nível de material e módulo.

3.3.2 Bancos de dados consolidados

A partir dos documentos primários, dois bancos de dados consolidados foram construídos pelo CTE e disponibilizados para fins desta pesquisa:

Banco_Dados_Galpoes_SP.xlsx — banco de dados principal, estruturado em três componentes:

- *Base Baseline*: 7.384 linhas × 59 colunas, com granularidade Material × Módulo × Projeto, para o cenário *Baseline* de todos os 19 galpões;
- *Base Design Final*: 7.363 linhas × 59 colunas, estrutura análoga para o cenário otimizado;
- *Planilha de Características (Galpoes_SP)*: 19 linhas × 48 colunas, com uma linha por galpão, contendo as variáveis agregadas: GWP/m² *Baseline* e *Design Final*, área construída, pé-direito, participação percentual de GWP por módulo e por sistema construtivo, massas de concreto e aço por m² e demais indicadores físicos e ambientais relevantes.
- *Resumo_Estrategias_GWP.xlsx* — banco auxiliar com o registro das estratégias de descarbonização aplicadas no *Design Final* de cada projeto, incluindo o tipo de intervenção e a variável N_Estratégias (número de estratégias por galpão).

Esses bancos consolidados constituíram a base de entrada para a rotina computacional de análise estatística descrita na Seção 3.6.4 e apresentada no Apêndice D.

3.3.3 Operacionalização das variáveis

As variáveis consideradas nas análises foram definidas e operacionalizadas conforme apresentado no Quadro 1, que descrevem as unidades, significados e fontes de cada uma delas.

Quadro 1 – Variáveis principais e suas operacionalizações

VARIÁVEL	UNIDADE	DESCRIÇÃO	FONTE
GWP_B	kgCO ₂ e/m ²	GWP total (módulos avaliados) por m ² GFA, cenário <i>Baseline</i>	Planilha Galpoes_SP

VARIÁVEL	UNIDADE	DESCRIÇÃO	FONTE
GWP_F	kgCO ₂ e/m ²	GWP total por m ² GFA, cenário <i>Design Final</i>	Planilha Galpoes_SP
Red_GWP_pct	%	Redução percentual: $[(GWP_B - GWP_F) / GWP_B] \times 100$	Calculada
Area_m2	m ²	Área bruta construída — GFA eTool	Relatórios PDF
Pe_Direito_m	m	Pé-direito livre do galpão	Relatórios PDF
MassConc_m2	kg/m ²	Massa total de concreto (todos os tipos) por m ² GFA	Planilha Galpoes_SP
Mass_m2	kg/m ²	Massa total de todos os materiais por m ² GFA	Planilha Galpoes_SP
pct_Fund	%	Parcela do GWP_B atribuída ao sistema de fundações	Planilha Galpoes_SP
pct_Piso	%	Parcela do GWP_B atribuída à laje de piso industrial	Planilha Galpoes_SP
pct_Sup	%	Parcela do GWP_B atribuída à superestrutura	Planilha Galpoes_SP
pct_Aco	%	Parcela do GWP_B atribuída ao aço (total)	Planilha Galpoes_SP
pct_concreto	%	Parcela do GWP_B atribuída ao concreto (total)	Planilha Galpoes_SP
N_Estrategias	adimensional	Número de estratégias de descarbonização no <i>Design Final</i>	Resumo_Estrategias_GWP.xlsx

Fonte: Elaborado pelo autor com base no banco de dados da pesquisa, 2026.

A variável N_Estratégias merece nota metodológica específica: é contada como número de abordagens estratégicas distintas registradas no sumário de cenário do relatório eTool, e não como número de intervenções materiais individuais. Por exemplo, "substituição de cimento por BFS em fundações" e "substituição de cimento por BFS em piso industrial" são contadas como duas estratégias, por corresponderem a aplicações em sistemas construtivos distintos — ainda que compartilhem o mesmo princípio de descarbonização. Essa operacionalização é consistente com o banco de dados consolidado e é explicitada nas análises do Capítulo 4.

3.4 Escopo do ciclo de vida avaliado

3.4.1 Período de referência do estudo

Ambos os cenários — *Baseline* e *Design Final* — adotam Período de Referência de 60 anos (*Reference Study Period* — RSP), conforme declarado uniformemente nos 19 relatórios técnicos analisados, com a seguinte formulação: “*The estimated design life of the design is 60 years which has been adopted for the LCA study period*” (eTool, 2024). A adoção de um RSP único para toda a amostra é coerente com a lógica de comparabilidade estabelecida pela EN 15978:2011, que estrutura a avaliação ambiental de edifícios ao longo do ciclo de vida, e com referenciais internacionais de avaliação de carbono de ciclo de vida, como a RICS (2023), que estabelece 60 anos como período de referência para avaliações de edifícios não domésticos. Além disso, estudos internacionais de *benchmark* de carbono incorporado para edifícios industriais utilizam metodologias alinhadas à EN 15978:2011 e ao Level(s), reforçando a necessidade de escopos e períodos comparáveis entre projetos. Como esse valor foi adotado sem variação em toda a amostra, o RSP não constitui fonte de variabilidade entre os resultados dos empreendimentos analisados (European Committee for Standardization, 2011; Royal Institution of Chartered Surveyors, 2023; One Click LCA, 2021).

3.4.2 Unidade funcional

A unidade funcional adotada em todos os estudos é 1 m² de área bruta construída, conforme a definição de GFA (*Gross Floor Area*) da ferramenta eTool:

GFA eTool = Área Construída Total = áreas cobertas fechadas + áreas cobertas não fechadas (marquises/coberturas externas), excluídas as áreas de estacionamento, circulação de veículos, *shafts* e áreas descobertas.

Essa definição difere da GFA adotada pelo sistema de certificação LEED (*LEED Reference Guide*), que exclui as áreas cobertas não fechadas (marquises) do cálculo. A diferença é numericamente pequena — da ordem de 1% a 2% em projetos típicos desta amostra —, mas impede a comparação direta dos valores de GWP/m² desta pesquisa com estudos que adotem a GFA LEED como unidade funcional, sem o ajuste correspondente. Ao longo deste trabalho, todos os valores de GWP/m² referem-se exclusivamente à GFA eTool, conforme declarada em cada relatório.

3.4.3 Módulos avaliados e não avaliados

O Quadro 2 apresenta o status de avaliação de cada módulo do ciclo de vida segundo a EN 15978:2011, conforme declarado nos estudos desta amostra.

Quadro 2 – Status dos módulos do ciclo de vida nos estudos de ACV da amostra

ESTÁGIO	MÓDULO	DESCRIÇÃO	STATUS
Produto	A1–A3	Extração de matérias-primas, transporte e fabricação (<i>cradle-to-gate</i>)	Avaliado
Construção	A4	Transporte dos materiais ao canteiro de obras	Avaliado
Construção	A5	Instalação / construção no canteiro	MNA
Uso	B1	Desempenho em uso	MNA
Uso	B2	Manutenção	MNA
Uso	B3	Reparos	MNA
Uso	B4	Reposição de componentes com vida útil < RSP	Avaliado
Uso	B5	Requalificação / renovação	MNA
Uso	B6	Energia operacional	MNA
Uso	B7	Água operacional	MNA
Fim de vida	C1	Desconstrução / demolição	Avaliado

ESTÁGIO	MÓDULO	DESCRIÇÃO	STATUS
Fim de vida	C2	Transporte de resíduos de demolição	Avaliado
Fim de vida	C3	Processamento de resíduos para reuso/reciclagem	Declarado como zero ¹
Fim de vida	C4	Disposição final dos resíduos	Avaliado
Além do sistema	D	Potencial de reutilização, recuperação e reciclagem	MNA ²

Fonte: Elaborado pelo autor com base no banco de dados da pesquisa, 2026.

Legenda: MNA = Módulo Não Avaliado

Notas:

¹ O módulo C3 está incluído no escopo declarado, mas apresenta valor de GWP igual a zero em todos os projetos da amostra, conforme reportado nas LCIA Tables dos relatórios.

² O módulo D é excluído por decisão metodológica declarada nos estudos originais, em razão das incertezas inerentes às estimativas de reciclagem além das fronteiras do sistema no contexto brasileiro, conforme a NBR ISO 14044 (ABNT, 2006) e a EN 15978:2011.

Justificativa da seleção. O módulo A1–A3 é o principal objeto de análise desta pesquisa, por representar a origem da maior parte do GWP total nesta tipologia, como demonstrado no Capítulo 4. O módulo A4 é avaliado por apresentar contribuição identificável, com distâncias de transporte declaradas nos modelos. O módulo B4 é avaliado porque componentes como coberturas metálicas, impermeabilizações e equipamentos hidráulicos apresentam vida útil estimada inferior ao RSP de 60 anos, exigindo reposição durante o período de referência. Os módulos C1, C2 e C4 completam a fronteira "do berço ao túmulo" da avaliação. Os módulos operacionais B6 e B7 estão fora do escopo por definição — esta pesquisa trata exclusivamente do carbono incorporado, e não do carbono operacional.

3.5 Ferramenta computacional e método de caracterização

3.5.1 Ferramenta de ACV: eTool

Todos os 19 estudos foram realizados com a ferramenta eTool, desenvolvida pela empresa eTool PTY LTD (Austrália) (eTool Pty Ltd, 2024). A ferramenta oferece interface de modelagem específica para edificações, com banco de dados de inventário integrado, capacidade de gestão de cenários (*Baseline/Design Final*) e exportação de resultados em formato PDF e XLSX. O emprego da mesma

ferramenta, na mesma versão, em todos os 19 estudos constitui um dos pilares da homogeneidade metodológica da amostra — condição que elimina a variabilidade de resultados que decorreria do uso de diferentes softwares ou versões de bancos de dados de inventário.

Ressalta-se que o eTool foi utilizado para a modelagem da Avaliação do Ciclo de Vida e geração dos resultados ambientais primários, enquanto o tratamento estatístico posterior foi realizado em Python, conforme descrito na Seção 3.6.4.

3.5.2 Método de caracterização: CML-IA *Baseline* V4.5

O método de caracterização utilizado é o CML-IA *Baseline* V4.5, desenvolvido pelo Instituto de Ciências Ambientais da Universidade de Leiden, Países Baixos (Guinée *et al.*, 2002). O método converte os dados do inventário em indicadores de impacto ambiental por meio de fatores de caracterização. Para o indicador GWP, os fatores de equivalência adotados correspondem ao Potencial de Aquecimento Global em horizonte de 100 anos (GWP-100), conforme os valores estabelecidos pelo IPCC (IPCC, 2013). O método CML-IA V4.5 é utilizado de forma uniforme em todos os 19 estudos, eliminando o método de caracterização como fonte adicional de variação entre projetos.

3.5.3 Qualidade dos dados de inventário e Declarações Ambientais de Produto

Os dados de inventário utilizados nos modelos eTool são majoritariamente dados genéricos provenientes do banco de dados interno da ferramenta — estimativas representativas de categorias de materiais (concreto 30 MPa, aço estrutural, telha metálica, estaca de concreto centrifugado etc.) sem especificação do fabricante ou planta produtiva. Nenhum dos 19 modelos incorpora formalmente dados de Declaração Ambiental de Produto (EPD) de fabricantes específicos — o número de elementos EPD inseridos no software é zero em todos os estudos. Em alguns projetos, EPDs verificadas de fabricantes nacionais (como ArcelorMittal, Votorantim e CSN) foram consultadas como documentação de referência ou suporte para parâmetros de modelagem, mas sem inserção formal como dados de inventário no modelo computacional.

A qualidade dos dados é avaliada internamente pela ferramenta eTool por critérios de relevância geográfica, temporal e tecnológica. O critério de relevância geográfica (*Geographical Relevancy*) — que verifica se os dados do inventário são

representativos da localização do projeto — foi classificado como "*Failed*" em todos os 19 estudos, refletindo a origem australiana e europeia do banco de dados eTool e a ausência de representações específicas do mercado brasileiro de materiais de construção. As implicações desta limitação para a interpretação dos resultados são tratadas na Seção 3.8.3.

3.5.4 Revisão independente

Os estudos de ACV foram submetidos a processo de revisão independente conduzido pela consultoria Cerclos, com o objetivo de verificar a conformidade do escopo declarado, a adequação dos dados de inventário, a correção dos cálculos de impacto e a razoabilidade das conclusões, em alinhamento aos requisitos da ISO 14044:2006.

Até o fechamento desta pesquisa, 15 dos 19 estudos contavam com revisão independente concluída. Os cenários Design Final dos galpões E05-G1, E09-G1, E09-G2 e E09-G3 ainda não possuíam verificação independente concluída, embora seus respectivos cenários Baseline contassem com revisão finalizada. Essa condição é explicitada nas tabelas, gráficos e análises em que os resultados do Design Final desses galpões são utilizados.

3.6 Tratamento estatístico dos dados

3.6.1 Estatística descritiva

O perfil estatístico do GWP/m² é caracterizado por um conjunto completo de medidas, calculadas separadamente para os cenários *Baseline* e *Design Final*:

Medidas de tendência central: média aritmética (μ) e mediana (P50).

Medidas de dispersão: desvio padrão (σ), coeficiente de variação ($CV = \sigma/\mu \times 100\%$), amplitude total (máximo – mínimo), amplitude interquartil ($IQR = Q3 - Q1$).

Percentis: P10, P25 (Q1), P50, P75 (Q3) e P90, que informam a distribuição interna da amostra e delimitam as classes do *benchmark* proposto na Seção 3.7.

Medidas de forma: *skewness* (coeficiente de assimetria) e *kurtosis* (coeficiente de curtose), que descrevem o formato da distribuição do GWP/m² e informam sobre a presença de caudas pesadas e de concentração acima ou abaixo da média (Field, 2018).

3.6.2 Análise de correlação

As associações entre variáveis numéricas são investigadas por meio de três coeficientes de correlação calculados simultaneamente:

Correlação de Pearson (r): mede a associação linear entre duas variáveis contínuas, pressupondo distribuição aproximadamente normal e ausência de valores extremos influentes. Varia entre -1 e $+1$; valores próximos de $|1|$ indicam associação linear forte; valores próximos de zero indicam ausência de associação linear (Field, 2018).

Correlação de Spearman (ρ): coeficiente não paramétrico baseado em postos (*ranks*), robusto à não normalidade e à presença de *outliers*. É o método preferencial quando a distribuição não satisfaz os pressupostos de normalidade, como é o caso da distribuição do GWP/m² desta amostra (Corder; Foreman, 2009).

Correlação de Kendall (τ): coeficiente não paramétrico baseado na concordância e discordância entre pares de observações, utilizado para avaliar associações monotônicas entre variáveis. Em comparação com medidas paramétricas, como a correlação de Pearson, tende a ser menos influenciado por valores extremos, sendo aplicável também em amostras pequenas. Quando há empates entre observações, recomenda-se o uso de versões ajustadas, como o τ -b de Kendall (KENDALL, 1938; KENDALL; GIBBONS, 1990).

O emprego simultâneo dos três coeficientes serve como verificação de robustez: quando os três convergem em direção e magnitude, a evidência de correlação é mais sólida do que quando apenas o coeficiente paramétrico é reportado. O critério de significância estatística adotado é $\alpha = 0,05$ ($p < 0,05$). As correlações são calculadas para dois conjuntos de pares de variáveis:

a) variáveis físicas e construtivas dos galpões (área construída, massa de concreto por m², massa total por m², pé-direito, percentuais de GWP por sistema) *versus* GWP/m² *Baseline*;

b) variáveis do processo de otimização (N_Estratégias, GWP_B inicial) *versus* percentual de redução de GWP (Red_GWP_pct).

3.6.3 Regressão log-log para análise do efeito de escala

Para investigar a hipótese de efeito de escala na intensidade de carbono incorporado (H3, declarada no Capítulo 1), adota-se um modelo de regressão linear log-log entre a área construída e o GWP/m² *Baseline*, especificado como:

$$\ln\left(\frac{GWPB}{m^2}\right) = \alpha + \beta \cdot \ln(\text{área}) + \varepsilon \quad \text{eq. 1}$$

onde α é o intercepto,

β é o coeficiente de elasticidade do GWP/m² em relação à área construída,

ε é o termo de erro com distribuição assumida normal e variância constante.

O coeficiente β captura o padrão de escala: um valor negativo indica que galpões maiores apresentam, em média, menor intensidade de carbono por m², configurando o efeito previsto na hipótese H3; um valor positivo indicaria que galpões maiores são, em média, mais intensivos. A transformação logarítmica de ambas as variáveis lineariza a relação de potência esperada entre escala e intensidade de carbono, tornando adequada a estimação por Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) (Wooldridge, 2019). Os resultados são reportados com o coeficiente de determinação (R^2), o coeficiente β com seu erro padrão e o p-valor do teste t correspondente.

3.6.4 Ferramentas computacionais

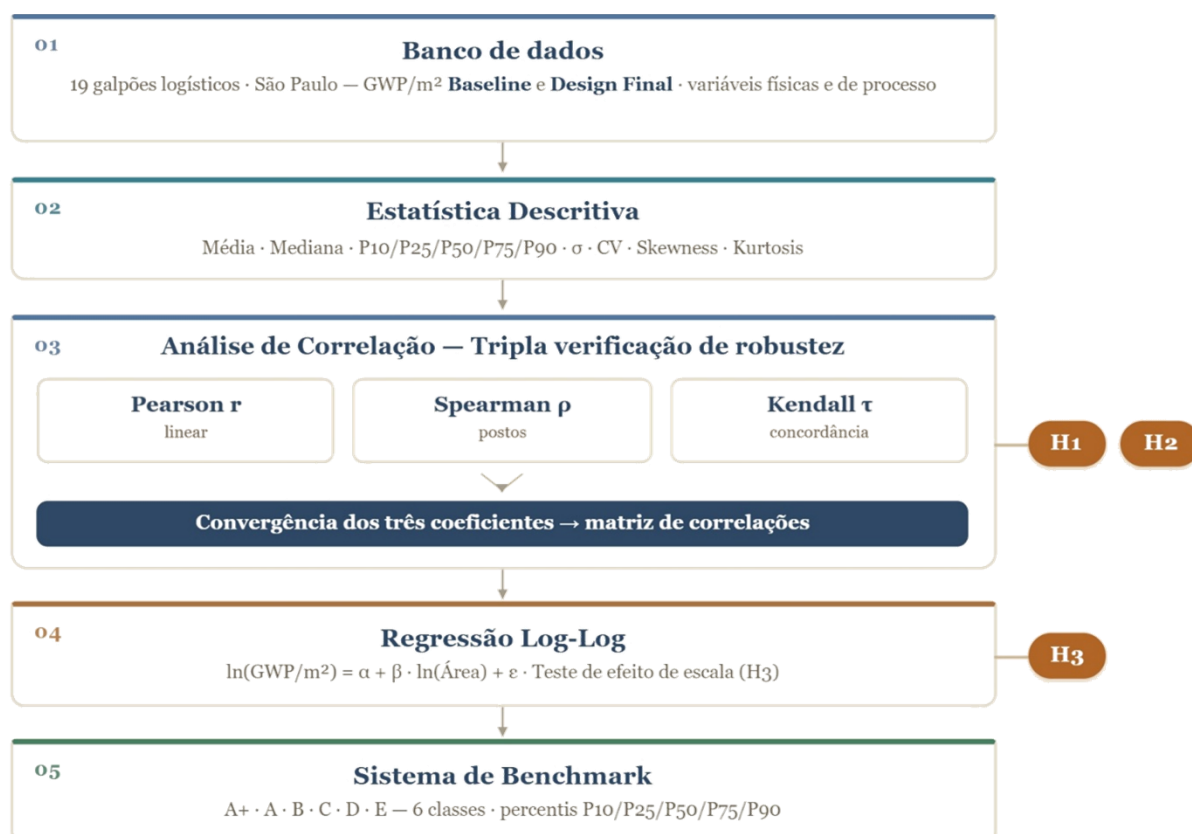
Os procedimentos de tratamento estatístico dos dados foram realizados em Python 3, por meio das bibliotecas pandas, numpy, scipy e statsmodels. A biblioteca Pandas foi utilizada para estruturação e manipulação da base de dados; numpy, para operações numéricas; scipy.stats, para o cálculo dos coeficientes de correlação de Pearson, Spearman e Kendall; e statsmodels, para a estimação do modelo de regressão log-log por Mínimos Quadrados Ordinários (MQO).

A rotina computacional processou a base consolidada dos 19 galpões logísticos, contendo as variáveis área construída, pé-direito, GWP/m² *Baseline*, GWP/m² *Design Final*, massa de concreto por metro quadrado e número de estratégias de descarbonização. A partir desses dados, foram calculadas as estatísticas descritivas, os coeficientes de correlação, o modelo de regressão log-log e os limiares percentílicos utilizados na construção do sistema de benchmark.

Para garantir a rastreabilidade e a reprodutibilidade dos resultados, a rotina computacional utilizada encontra-se integralmente apresentada no Apêndice D.

A Figura 9 sintetiza o encadeamento das etapas de análise estatística adotadas nesta pesquisa, desde os dados brutos até a construção do sistema de benchmark:

Figura 9 – Fluxograma do tratamento estatístico dos dados: etapas, métodos e conexão com as hipóteses de pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Para fins de reprodutibilidade, a rotina computacional apresentada no Apêndice D utiliza uma base consolidada com os 19 galpões da amostra, contendo as variáveis finais extraídas das planilhas Baseline e Design Final do Banco_Dados_Galpoes_SP.xlsx. Essa estrutura permite reproduzir os principais resultados estatísticos apresentados no trabalho, incluindo estatística descritiva, correlações, regressão log-log e classificação percentílica.

3.7 Construção do sistema de *benchmark*

3.7.1 Justificativa da abordagem percentilica

O sistema de *benchmark* proposto classifica os galpões logísticos em seis classes de desempenho em carbono incorporado (A+, A, B, C, D e E), com limiares derivados da distribuição empírica dos valores de GWP/m² *Baseline* da amostra. A opção por uma abordagem percentilica — em detrimento de metas absolutas derivadas de trajetórias de descarbonização ou de referenciais internacionais — é fundamentada em três razões complementares.

Razão 1 — Inexistência de referências nacionais preexistentes. Não há, na literatura ou nos sistemas normativos brasileiros, *benchmarks* de GWP/m² calibrados para galpões logísticos no Estado de São Paulo. A derivação de metas absolutas sem respaldo empírico no contexto nacional teria, inevitavelmente, caráter especulativo. A abordagem percentilica ancora o *benchmark* na realidade produtiva observada, tornando-o empiricamente fundamentado.

Razão 2 — Robustez à não normalidade. Como a distribuição do GWP/m² *Baseline* apresenta assimetria positiva pronunciada e curtose elevada — características que serão detalhadas no Capítulo 4 —, os percentis são medidas mais robustas do que a média como referência de posicionamento relativo, por serem insensíveis ao valor exato dos *outliers* da distribuição (Field, 2018).

Razão 3 — Eficácia comunicativa. *Benchmarks* baseados na distribuição observada da prática corrente permitem que projetistas e incorporadores compreendam intuitivamente onde determinado projeto se situa em relação ao mercado: um projeto classificado como "A+" sabe que está entre os 10% de menor carbono incorporado da tipologia; um projeto "E" sabe que está entre os 10% de maior impacto. Essa comunicabilidade é um requisito prático central para a adoção do *benchmark* pelo setor.

Adota-se como base de referência a distribuição do cenário *Baseline* — e não do *Design Final* — porque o *Baseline* representa a prática construtiva corrente antes de qualquer otimização, que é a referência mais relevante para classificar novos projetos ainda na fase de concepção de projeto. O uso do *Baseline* evita também que a classificação ambiental de um empreendimento dependa da disponibilidade ou da

intensidade das estratégias de descarbonização acessíveis ao projetista em determinado contexto.

3.7.2 Definição das classes e limiares

Os limites que separam as seis classes foram definidos a partir dos percentis **P10, P25, P50, P75 e P90** da distribuição empírica do **GWP/m² Baseline** calculado para os 19 galpões analisados, conforme observado no Quadro 3. Esses percentis funcionam como pontos de corte que segmentam a distribuição em faixas progressivas de desempenho ambiental. Assim, cada classe corresponde a um intervalo específico dessa distribuição, permitindo comparar os galpões de forma consistente e baseada em dados estatísticos representativos.

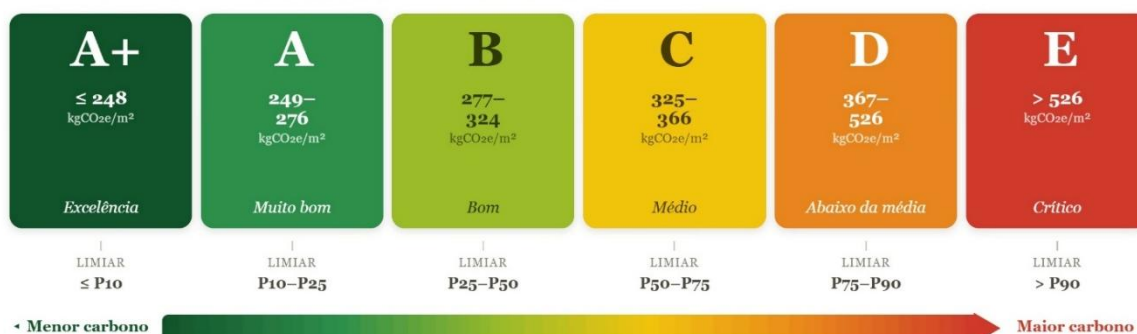
Quadro 3 – Definição das classes do sistema de benchmark de carbono incorporado

CLASSE	INTERVALO (KGCO ₂ E/M ²)	LIMIAR ESTATÍSTICO	INTERPRETAÇÃO DE DESEMPENHO
A+	≤ P10	Abaixo do décimo percentil	Desempenho de excelência — 10% de menor carbono da tipologia
A	> P10 e ≤ P25	Entre P10 e primeiro quartil	Desempenho muito bom
B	> P25 e ≤ P50	Entre Q1 e mediana	Desempenho bom — acima da mediana
C	> P50 e ≤ P75	Entre mediana e terceiro quartil	Desempenho médio — abaixo da mediana
D	> P75 e ≤ P90	Entre Q3 e nonagésimo percentil	Desempenho abaixo da média
E	> P90	Acima do nonagésimo percentil	Desempenho crítico — 10% de maior carbono da tipologia

Fonte: Elaborado pelo autor com base no banco de dados da pesquisa, 2026.

A Figura 10 complementa o Quadro 3 com a escala visual das classes do benchmark, tornando imediata a leitura dos limiares de desempenho:

Figura 10 – Escala visual do sistema de benchmark de carbono incorporado: seis classes (A+ a E) com intervalos em kgCO₂e/m²



Fonte: Elaborado pelo autor com base nos percentis da distribuição empírica da amostra (n = 19), 2026.

A nomenclatura das classes (A+, A, B, C, D, E) é intencionalmente análoga à adotada por sistemas de classificação de eficiência energética operacional amplamente conhecidos no mercado brasileiro — como o Selo PROCEL Edifica e a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) —, com o objetivo de facilitar a compreensão e a adoção do *benchmark* por profissionais do setor da construção e por incorporadores logísticos.

3.8 Limitações da amostra e cuidados metodológicos

A transparência científica exige que as condições que delimitam a validade e a generalização dos resultados sejam explicitadas com clareza e sem eufemismos. As limitações não invalidam os resultados desta pesquisa, mas condicionam a forma como devem ser interpretados.

3.8.1 Tamanho amostral e caráter exploratório

Com **n = 19** projetos, a amostra é insuficiente para afirmações de representatividade estatística em relação ao conjunto total de galpões logísticos do Estado de São Paulo ou do Brasil. Os resultados têm caráter exploratório e descritivo: caracterizam o perfil de uma amostra específica, identificam padrões plausíveis e fundamentam uma proposta de *benchmark* empiricamente ancorada, mas não permitem generalização direta para toda a tipologia (Gil, 2017). Análises estatísticas

com $n = 19$ são especialmente sensíveis à influência de valores extremos (*outliers*) sobre médias, desvios padrão e coeficientes de correlação, o que justifica o uso paralelo de medidas não paramétricas e a verificação dos resultados com e sem os projetos de comportamento atípico.

3.8.2 Concentração geográfica

Todos os 19 galpões estão localizados no Estado de São Paulo, com predominância na Região Metropolitana de São Paulo. Essa concentração implica que os *benchmarks* propostos são válidos primariamente para o contexto paulista e não devem ser diretamente extrapolados para outras unidades federativas. Regiões com diferentes disponibilidades de BFS, diferentes parques industriais cimenteiros, diferentes padrões geotécnicos de solos ou diferentes práticas construtivas regionais podem apresentar perfis de GWP/m² sistematicamente distintos dos observados nesta amostra.

3.8.3 Relevância geográfica dos dados de inventário

Como mencionado na Seção 3.5.3, o critério de relevância geográfica foi avaliado como "*Failed*" em todos os 19 estudos pela ferramenta eTool. Isso significa que os dados de inventário utilizados na modelagem — de origem australiana e europeia — não são estritamente representativos das condições de produção de materiais no Brasil, o que pode gerar viés nos valores absolutos de GWP/m². No entanto, dado que a mesma base de dados é aplicada uniformemente a todos os 19 projetos, a comparabilidade relativa interna à amostra é preservada: as diferenças observadas no GWP/m² entre projetos refletem, de forma consistente, as diferenças nos sistemas e quantitativos de materiais, e não inconsistências de dados. A limitação afeta a validação externa dos valores absolutos — especialmente quando comparados a referências de outros países —, não a robustez das análises comparativas internas.

3.8.4 Ausência de EPDs específicos nos modelos eTool

A utilização exclusiva de dados genéricos, sem inserção formal de EPDs de fabricantes, pode subestimar ou superestimar a intensidade carbônica de materiais específicos utilizados nos projetos. Por exemplo, concretos produzidos com cimentos de usinas que utilizam matrizes energéticas mais limpas, ou aços fabricados com

maior proporção de sucata reciclada, podem apresentar intensidade carbônica real inferior à estimada pelos dados genéricos. O impacto dessa limitação sobre os resultados é atenuado pela já mencionada estabilidade da intensidade carbônica do concreto entre projetos ($CV = 9,5\%$ na amostra), que sugere que os dados genéricos capturam adequadamente a variação relativa entre projetos, mesmo que os valores absolutos possam diferir dos que seriam obtidos com EPDs nacionais verificadas.

3.8.5 *Cenários Design Final sem revisão independente concluída*

Até o fechamento desta pesquisa, 15 dos 19 estudos contavam com revisão independente concluída. Os quatro casos sem verificação independente concluída correspondem aos cenários Design Final dos galpões E05-G1, E09-G1, E09-G2 e E09-G3. Seus respectivos cenários Baseline contam com revisão independente concluída e são incluídos sem ressalvas nas análises descritivas e comparativas do cenário de referência.

Os resultados de Design Final desses quatro galpões são apresentados nos resultados gerais, por integrarem a base consolidada da pesquisa, mas são interpretados com ressalva nas análises específicas sobre eficácia das estratégias de descarbonização. Quando pertinente, os indicadores associados às estratégias devem ser reportados também com a exclusão desses casos, considerando amostra reduzida de $n = 15$.

3.8.6 *Outlier* estatístico — Galpão E09-G3

O galpão E09-G3 apresenta GWP Baseline de $877 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$ — valor consideravelmente acima do segundo maior da amostra e aproximadamente 2,7 vezes a mediana amostral ($324 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$). Esse valor configura um outlier estatisticamente expressivo, muito provavelmente associado a características geotécnicas excepcionais do solo — como a presença de camadas compressíveis ou de baixa resistência que exigiram fundações profundas em volume e comprimento atípicos. O galpão E09-G3 é mantido em todas as análises descritivas — onde sua influência sobre a média e o desvio padrão é explicitada — e identificado separadamente nas análises de correlação e regressão, de modo a permitir a avaliação de sua influência sobre os resultados.

3.8.7 Definição e contagem de N_Estratégias

A operacionalização da variável N_Estratégias como número de abordagens estratégicas — e não de intervenções materiais individuais — implica que o coeficiente de correlação entre N_Estratégias e Red_GWP_pct mede a associação entre a *amplitude* do portfólio de estratégias e o percentual de redução obtido. Essa definição é internamente consistente na amostra, mas pode divergir da adotada em outros estudos que contabilizam estratégias de forma diferente. Comparações diretas da variável N_Estratégias com outros trabalhos requerem verificação prévia da compatibilidade operacional das definições.

4 RESULTADOS

4.1 Perfil estatístico do GWP/m²

4.1.1 Caracterização individual dos 19 galpões

Tabela 2 – Dados individuais dos 19 galpões logísticos da amostra

Código Galpão	Área (m ²)	Pé-direito (m)	GWP Baseline (kgCO ₂ e/m ²)	GWP Design Final (kgCO ₂ e/m ²)	Red. (%)	Nº estratégias
E01-G1	62.818	12,0	491,5	395,8	19,5	3
E01-G2	15.627	12,0	611,5	482,2	21,2	3
E02-G1	11.798	12,0	323,9	261,4	19,3	3
E02-G2	53.755	12,0	237,6	209,0	12,0	5
E02-G3	19.274	12,0	321,9	315,0	2,2	5
E03-G1	173.436	17,3	273,8	216,7	20,9	3
E04-G1	105.351	12,0	208,5	199,2	4,4	1
E04-G2	23.167	12,0	278,7	269,4	3,3	1
E04-G3	46.383	12,0	264,4	255,5	3,4	1
E04-G4	51.448	12,0	360,6	266,8	26,0	1
E05-G1*	106.505	14,6	279,1	276,4	1,0	1
E06-G1	131.426	12,0	347,1	288,4	16,9	6
E06-G2	105.869	12,0	288,9	232,2	19,6	7
E07-G1	9.060	10,0	361,8	257,7	28,8	6
E07-G2	11.318	10,0	371,1	265,6	28,4	6
E08-G1	14.416	12,0	504,7	463,9	8,1	2
E09-G1*	24.442	10,0	251,1	174,6	30,5	9
E09-G2*	13.544	10,0	333,3	222,3	33,3	9
E09-G3*	4.376	10,0	877,3	584,3	33,4	8

Fonte: Elaborado pelo autor com base no banco de dados da pesquisa, 2026.

Nota: *Cenários Design Final dos galpões E05-G1, E09-G1, E09-G2 e E09-G3 sem revisão independente concluída até o fechamento desta pesquisa; ver Seção 3.8.5.

Quadro 4 – Benchmark Proposto — Sistema de Classificação

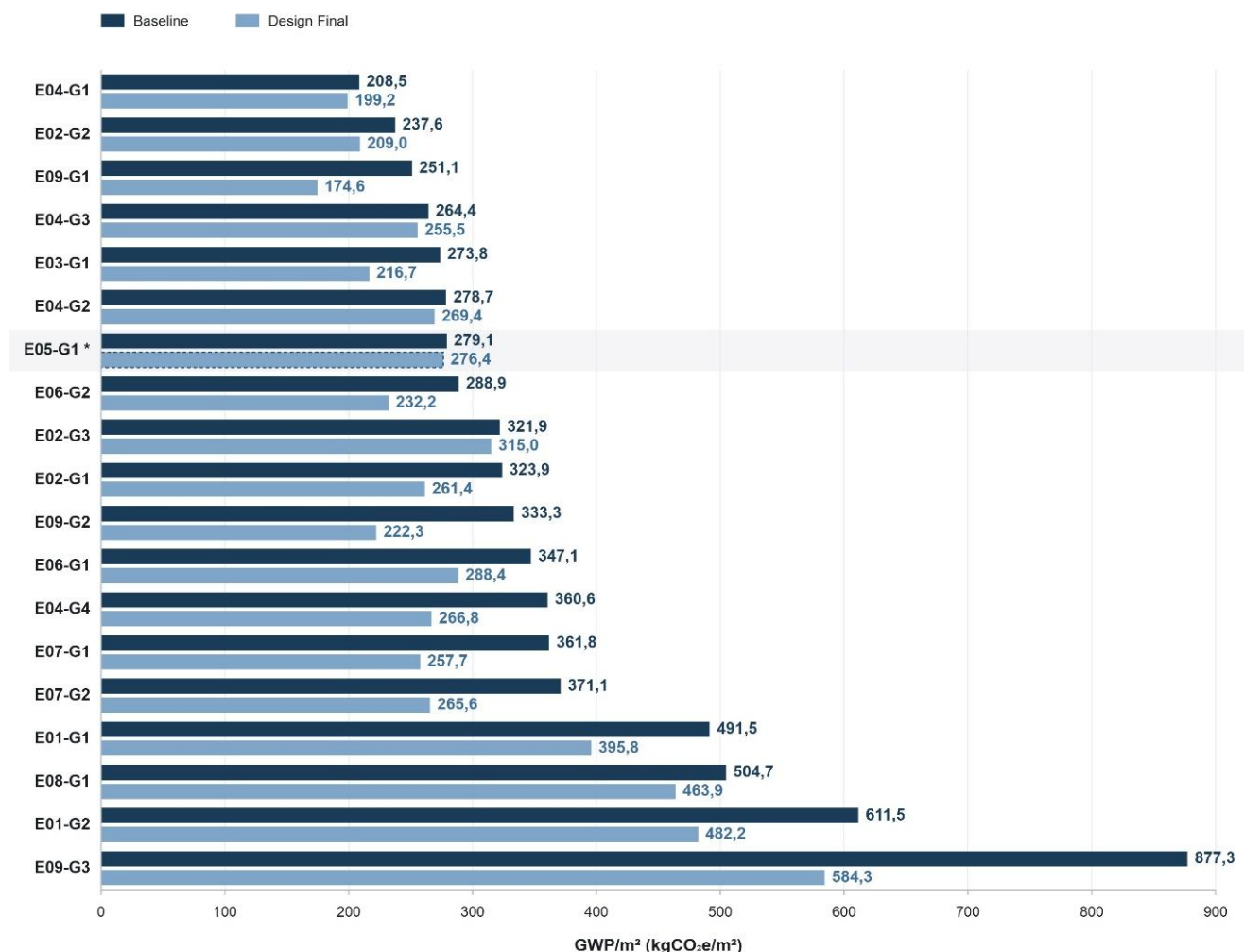
CLASSE	GWP Baseline (kgCO ₂ E/m ²)	GWP Final (kgCO ₂ E/m ²)	Red. Min.	Descrição
A+ SUPERIOR	≤ 248	≤ 207	≥ 25%	Melhor prática (≤ P10)
A EXCELENTE	249 – 276	≤ 227	≥ 20%	Alta eficiência (P10–P25)

CLASSE	GWP Baseline (kgCO₂E/m²)	GWP Final (kgCO₂E/m²)	Red. Min.	Descrição
B BOM	277 – 324	≤ 266	≥ 15%	Benchmark central (P25–P50)
C REGULAR	325 – 366	≤ 302	≥ 10%	Aceitável (P50–P75)
D CRÍTICO	367 – 526	—	≥ 5%	Atenção (P75–P90)
E ALERTA	> 526	—	< 5%	Ação urgente (> P90)

Fonte: Elaborado pelo autor com base no banco de dados da pesquisa, 2026

O Gráfico 1 apresenta graficamente os valores de GWP/m² Baseline e Design Final para cada galpão em barras agrupadas, ordenadas pelo valor baseline crescente. A visualização facilita a comparação das magnitudes absolutas de redução e a identificação de projetos que ultrapassam os limiares de classificação benchmark após intervenção.

Gráfico 1 – GWP/m² Baseline e Design Final dos 19 galpões logísticos analisados (kgCO₂e/m²)



Fonte: Elaborado pelo autor com base nos relatórios de ACV, 2026.

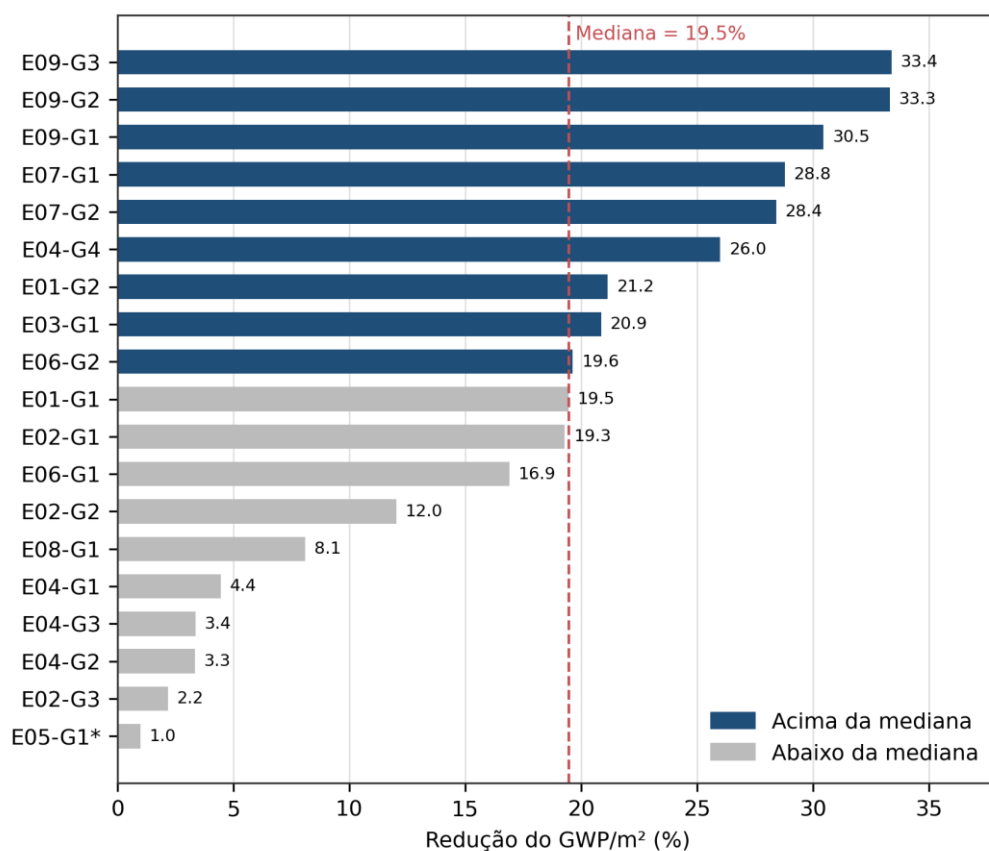
Notas:

* Cenário Design Final do galpão E05-G1 sem revisão independente concluída; ver Seção 3.8.5.

1. As barras estão ordenadas pelo GWP/m² baseline em ordem crescente.

A comparação entre os cenários Baseline e Design Final permite avaliar a magnitude da redução percentual do GWP/m² obtida em cada galpão da amostra. Para evidenciar a variação entre os projetos, o Gráfico 2 apresenta as reduções individuais ordenadas em ordem decrescente, distinguindo os galpões com desempenho acima e abaixo da mediana amostral. Essa representação permite identificar tanto os projetos com maior potencial de mitigação quanto aqueles em que as estratégias adotadas produziram reduções mais limitadas, oferecendo uma leitura comparativa do desempenho ambiental alcançado no cenário otimizado.

Gráfico 2 – Redução percentual do GWP/m² entre Baseline e Design Final, por galpão



Fonte: Elaborado pelo autor com base no banco de dados da pesquisa, 2026.

Nota: *cenário Design Final do galpão E05-G1 sem revisão independente concluída (ver Seção 3.8.5); linha tracejada indica a mediana das reduções (19,5%).

A amplitude observada no GWP/m² Baseline — de 209 kgCO₂e/m² (E04-G1) a 877 kgCO₂e/m² (E09-G3) — revela uma heterogeneidade expressiva entre projetos de mesma tipologia, como ilustra o Gráfico 1. Dois padrões distintos emergem da leitura dos dados. O primeiro é que os galpões de maior área construída tendem a apresentar menores valores de GWP/m², como nos casos do E04-G1 (105.351 m², GWP_B = 209 kgCO₂e/m²) e do E03-G1 (173.436 m², GWP_B = 274 kgCO₂e/m²), sugerindo a existência de um efeito de escala que será investigado formalmente na Seção 4.6. O segundo padrão é que o percentual de redução obtido no Design Final — apresentado, por galpão, no Gráfico 2 — não é monotonicamente crescente com o número de estratégias: o E04-G4 alcançou 26,0% de redução com apenas 1 estratégia, enquanto os projetos E09-G1 e E09-G2, com 9 estratégias, obtiveram reduções de 30,5% e 33,3%, respectivamente — diferença proporcionalmente menor

do que o múltiplo de intervenções aplicadas. Esse achado, denominado aqui paradoxo da eficiência, é analisado em detalhe na Seção 4.4.3.

4.1.2 Estatística descritiva: *Baseline* e *Design Final*

A Tabela 3 apresenta a estatística descritiva completa do GWP/m² nos dois cenários avaliados e do percentual de redução entre eles.

Tabela 3 – Estatística descritiva do Baseline, Design Final e Redução GWP.

Estatística	<i>Baseline</i> (kgCO₂e/m²)	<i>Design Final</i> (kgCO₂e/m²)	Redução GWP (%)
n (projetos)	19	19	19
Média (μ)	367,7	296,6	17,5
Mediana (P50)	323,9	265,6	19,5
Desvio padrão (σ)	159,2	108,3	11,1
Coef. de variação (CV)	43,3%	36,5%	63,6%
Mínimo	208,5	174,6	1,0
P10	248,4	207,0	3,1
P25 (Q1)	276,2	227,2	6,3
P75 (Q3)	366,4	301,7	27,2
P90	526,1	467,5	31,0
Máximo	877,3	584,3	33,4
IQR (P75 – P25)	90,2	74,5	20,9
<i>Skewness</i>	2,14	1,52	-0,15
<i>Kurtosis</i>	5,25	1,73	-1,35

Fonte: Elaborado pelo autor com base no banco de dados da pesquisa, 2026.

A comparação entre os cenários Baseline e Design Final revela três resultados centrais. Primeiro, a eficácia das estratégias de descarbonização corresponde a uma redução média de 17,5% no GWP/m² dos galpões (mediana de 19,5%); em termos agregados, a média do GWP/m² da amostra recua 19,3%, de 367,7 para 296,6 kgCO₂e/m². Segundo o Design Final não elimina a heterogeneidade entre projetos: o CV permanece elevado, em 36,5%, indicando que as desigualdades de desempenho estrutural da amostra persistem após a otimização — um resultado

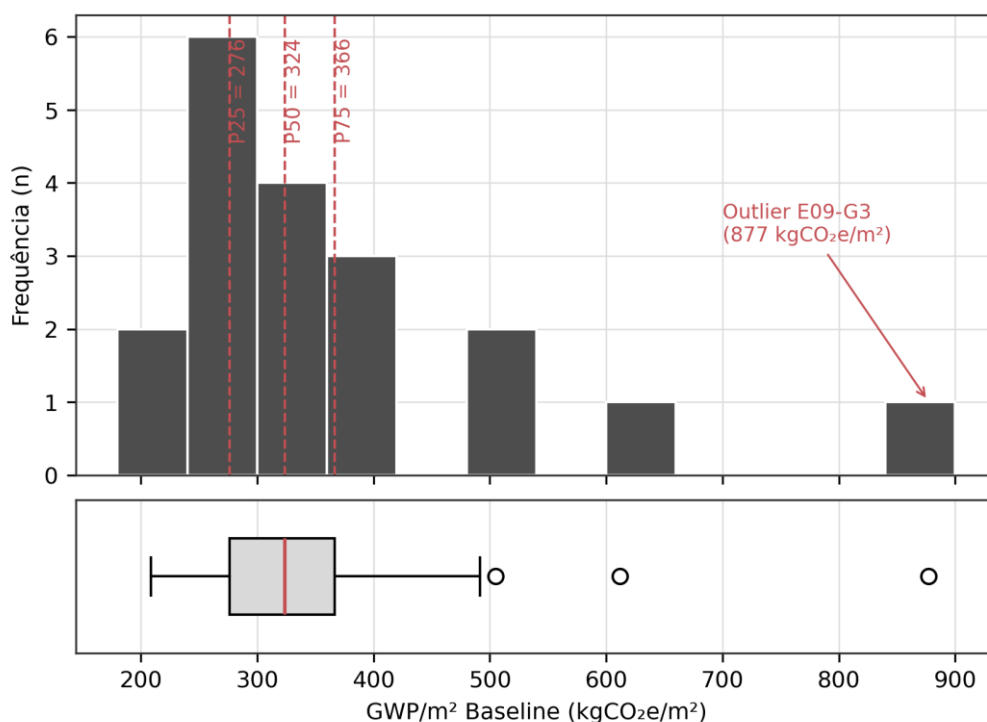
capturado pela alta correlação entre GWP_B e GWP_F, discutida na Seção 4.5. Terceiro, a amplitude de redução é expressiva: de 1,0% (E05-G1, caso com ressalva metodológica; ver Seção 3.8.5) a 33,4% (E09-G3), o que revela que o potencial de descarbonização é fortemente condicionado pelo conjunto de estratégias disponíveis e pela intensidade com que são aplicadas.

4.1.3 Distribuição do GWP/m² e heterogeneidade amostral

O par skewness = 2,14 e kurtosis = 5,25 caracteriza a distribuição do GWP/m² *Baseline* como leptocúrtica com assimetria positiva pronunciada — ou seja, uma curva mais alongada e pontiaguda do que a distribuição normal, com os dados fortemente concentrados ao redor da média e caudas mais pesadas, o que indica maior probabilidade de valores extremos. Na prática, isso se traduz em: a maior parte dos projetos concentra-se abaixo de 400 kgCO₂e/m², mas uma cauda direita longa é sustentada pelo valor excepcional do Galpão E09-G3 (877 kgCO₂e/m²). Essa morfologia distribucional tem implicações diretas para a interpretação das estatísticas: a média (367,7 kgCO₂e/m²) é 13,5% superior à mediana (323,9 kgCO₂e/m²), distorção típica de distribuições com outliers à direita, e representa o galpão "médio" com menor fidelidade do que a mediana. A mediana — insensível a valores extremos — é, portanto, a medida preferencial de tendência central para esta amostra.

Simultaneamente, o valor relativamente baixo do IQR (90 kgCO₂e/m²) revela que o intervalo central da distribuição — onde se situam 50% dos projetos, entre P25 = 276 e P75 = 366 kgCO₂e/m² — é mais homogêneo do que o CV de 43,3% poderia sugerir. A alta variância global é, em grande parte, uma consequência da presença do E09-G3 e de uma pequena fração de projetos de baixa escala com condições geotécnicas desfavoráveis, e não de uma dispersão uniforme ao longo de toda a amostra. Para fins práticos de benchmarking, o padrão de desempenho de um galpão logístico "típico" no Estado de São Paulo situa-se na faixa de 276 a 366 kgCO₂e/m² (intervalo interquartil), com valor representativo próximo a 324 kgCO₂e/m² (mediana).

Gráfico 3 – Distribuição do GWP/m² Baseline: histograma e boxplot com percentis (n = 19)



Fonte: Elaborado pelo autor com base no banco de dados da pesquisa, 2026.

Comparativamente, os valores reportados na literatura para edificações industriais e de armazenagem em países europeus situam-se na faixa de 200 a 600 kgCO₂e/m² para o ciclo de vida completo (Röck et al., 2020; Steel Construction Institute, 2020), o que indica que a amostra brasileira — com exceção do outlier E09-G3 — é consistente com o padrão internacional para a tipologia, ainda que a comparação direta seja limitada pelas diferenças metodológicas e de escopo discutidas na Seção 3.8.3.

4.2 Contribuição por módulo do ciclo de vida

4.2.1 Perfil de contribuição modular: dominância do A1–A3

A análise da contribuição modular permite identificar em quais etapas do ciclo de vida se concentram os maiores impactos climáticos dos galpões logísticos avaliados. Para isso, os resultados do cenário Baseline foram organizados por módulo do ciclo de vida, considerando os módulos efetivamente avaliados nos estudos de ACV da amostra. Essa abordagem permite verificar se o GWP total decorre

predominantemente da produção dos materiais, do transporte, da reposição durante a vida útil ou das etapas de fim de vida.

A Tabela 4 sintetiza a contribuição percentual média de cada módulo para o GWP total dos 19 galpões no cenário Baseline. Além da participação média, são apresentados o desvio padrão, os valores mínimos e máximos observados e a contribuição média em kgCO₂e/m², permitindo avaliar tanto a relevância relativa de cada módulo quanto sua variabilidade entre os projetos.

Tabela 4 – Contribuição média por módulo do ciclo de vida.

Módulo	Descrição	Média (%)	DP (pp)	Mín. (%)	Máx. (%)	Média (kgCO₂e/m²)
A1–A3	Fabricação e produção (cradle-to-gate)	82,4	4,5	75,4	88,5	303,7
A4	Transporte ao canteiro	3,1	0,6	2,5	4,6	11,9
B4	Reposição de materiais (manutenção)	4,1	3,0	0,1	8,4	13,8
C1+C2+C4	Fim de vida (demolição + transporte + disposição)	10,4	2,4	5,0	12,6	38,3
Total avaliado		≈ 100				≈ 368

Fonte: Elaborado pelo autor com base no banco de dados da pesquisa, 2026.

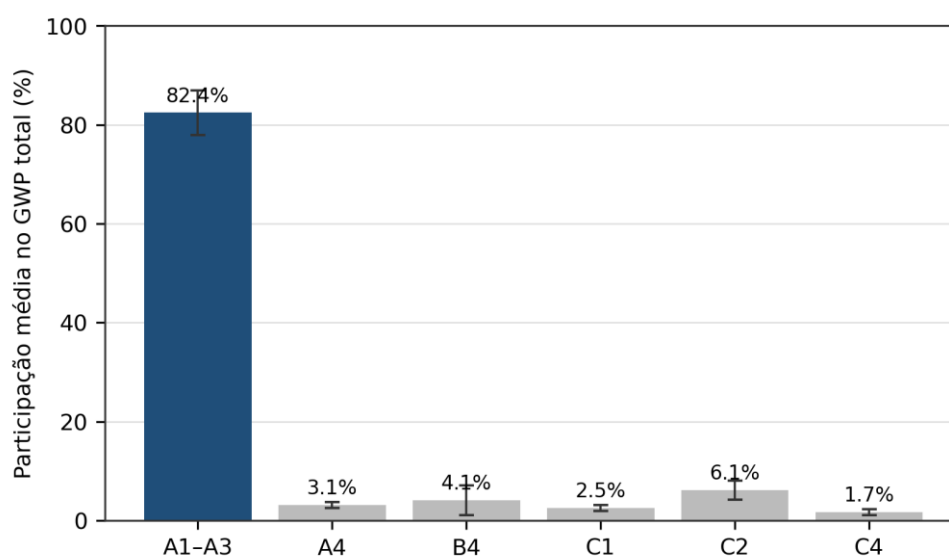
Nota: Valores referentes ao GWP total dos módulos avaliados. Módulos MNA (A5, B1–B3, B5–B7, C3, D) excluídos do cálculo.

Os resultados apresentados na Tabela 4 evidenciam a forte predominância dos módulos A1–A3, correspondentes à fabricação e produção dos materiais, que representam, em média, 82,4% do GWP total avaliado. Esse resultado indica que mais de quatro quintos das emissões associadas aos galpões logísticos analisados estão concentradas na etapa cradle-to-gate, isto é, antes da chegada dos materiais ao canteiro de obras. Em comparação, o transporte ao canteiro (A4) representa

participação média de apenas 3,1%, enquanto a reposição de materiais durante a vida útil (B4) contribui com 4,1%. As etapas de fim de vida, agregadas nos módulos C1, C2 e C4, somam 10,4% do GWP total.

Para complementar a leitura tabular e facilitar a comparação visual entre os módulos, o Gráfico 4 apresenta a participação média de cada etapa no GWP total. Diferentemente da Tabela 4, que agrega os módulos de fim de vida, o Gráfico 4 apresenta C1, C2 e C4 separadamente, permitindo observar com maior clareza a contribuição específica de cada uma dessas etapas.

Gráfico 4 – Contribuição média por módulo do ciclo de vida para o GWP total (Baseline, n = 19)



Fonte: Elaborado pelo autor com base no banco de dados da pesquisa, 2026.

Nota: barras de erro indicam ± 1 desvio padrão da participação entre os 19 projetos.

O resultado mais expressivo da análise modular é a dominância absoluta do módulo A1–A3, que responde em média por 82,4% do GWP total, com desvio padrão de apenas 4,5 pontos percentuais entre os 19 projetos. A baixíssima variabilidade desta proporção — o coeficiente de variação do percentual A1–A3 é de 5,5% — é um achado de natureza estrutural: independentemente da escala, do sistema construtivo ou das especificações técnicas do galpão, a fabricação dos materiais de construção responde por aproximadamente quatro quintos das emissões de GWP de toda a vida útil do edifício.

Esse resultado tem implicação direta para a estratégia de descarbonização desta tipologia: intervenções operacionais — incluindo eficiência energética, sistemas de energia renovável ou redução de consumo de água —, ainda que relevantes para outros objetivos ambientais, exercem impacto marginal sobre o GWP do ciclo de vida de galpões logísticos, dado que os módulos B6 (energia operacional) e B7 (água) estão fora do escopo da avaliação declarada e, mesmo que fossem incluídos, representariam fração comparativamente pequena do impacto total. O foco da descarbonização deve ser direcionado, portanto, exclusivamente aos materiais de construção — em especial aos materiais cimentícios —, conforme confirmado pela análise de estratégias da Seção 4.4.

A contribuição do módulo C1+C2+C4 (fim de vida), de 10,4% em média, é numericamente relevante e superior à de A4 (3,1%) e B4 (4,1%), sinalizando que as decisões sobre desconstrução e destinação dos resíduos de demolição possuem impacto não desprezível no balanço de carbono incorporado. O módulo B4, por sua vez, reflete a necessidade de reposição de componentes com vida útil inferior ao RSP de 60 anos — principalmente coberturas metálicas e sistemas de impermeabilização —, o que justifica sua inclusão como módulo avaliado.

O achado da dominância de A1–A3 está em linha com a literatura internacional: Röck *et al.* (2020) identificaram participação de 60% a 90% do módulo de produção de materiais para edificações não residenciais de baixo consumo operacional; Säynäjoki *et al.* (2017) confirmaram padrão similar para edifícios comerciais e industriais em contextos europeus. A faixa de 82,4% encontrada nesta amostra posiciona-se no terço superior desse intervalo, o que é consistente com galpões logísticos sem sistemas intensivos de climatização e com volume expressivo de materiais pesados por m².

4.3 Análise de materiais e sistemas construtivos

4.3.1 Participação relativa dos materiais no GWP total

A análise por materiais e sistemas construtivos permite identificar quais componentes físicos dos galpões concentram a maior parcela do carbono incorporado no cenário Baseline. Enquanto a avaliação modular indica em que etapa do ciclo de vida o impacto ocorre, a análise material e sistêmica mostra quais elementos construtivos são responsáveis por esse impacto. Essa distinção é essencial para

orientar estratégias de mitigação mais eficazes, especialmente em uma tipologia marcada por grande consumo de concreto em fundações, pisos industriais e elementos estruturais.

A Tabela 5 apresenta a participação relativa dos principais materiais e sistemas construtivos no GWP total dos 19 galpões analisados, organizando os resultados sob duas perspectivas complementares: a primeira classifica os impactos por material, distinguindo concreto, aço e demais materiais; a segunda classifica os impactos por sistema construtivo, incluindo superestrutura, piso industrial, fundações e envolvente. A composição individual de materiais e a massa de concreto por m² de cada galpão, utilizadas como base para essa análise agregada, encontram-se detalhadas no Apêndice B.

Tabela 5 – Participação relativa dos materiais e sistemas no GWP total do cenário baseline

Material / Sistema	Participação		Intensidade carbônica
	média no GWP	DP (pp)	
	total (%)		
Concreto (todos os tipos)	63,1	10,6	65,1 kgCO ₂ e/t (CV = 9,5%)
Aço (armação + estrutural + telhas)	29,2	8,9	442,5 kgCO ₂ e/t (CV = 9,1%)
Demais materiais	7,7	3,7	—
Superestrutura (pórtico + cobertura)	47,4	23,9	—
Piso industrial (Laje de piso)	24,2	20,1	—
Sistema de fundações	22,0	13,2	—
Envolvente (paredes + aberturas) + Isolamento	4,8	3,3	—

Fonte: Elaborado pelo autor com base no banco de dados da pesquisa, 2026.

Nota: As perspectivas "por material" e "por sistema" são categorizações distintas do mesmo total de GWP; o somatório dos percentuais por sistema pode diferir de 100% em função do método de

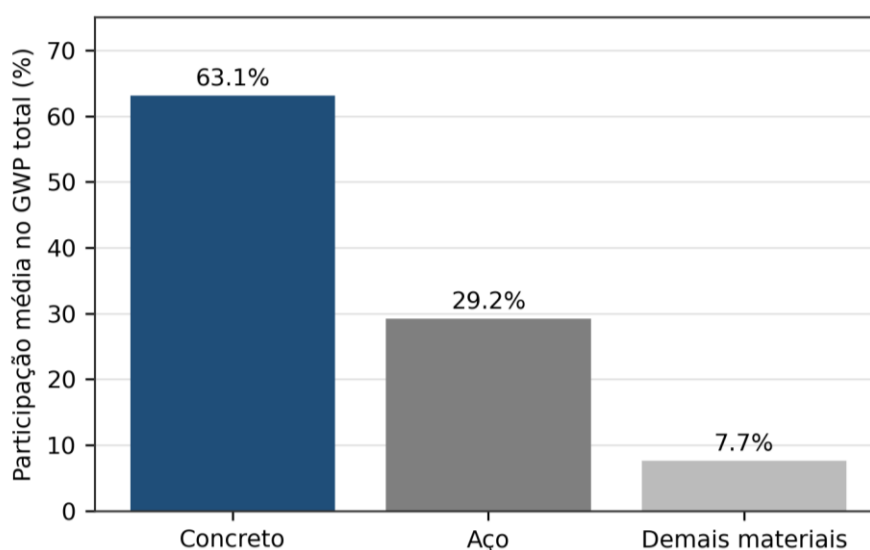
atribuição de elementos compartilhados entre sistemas no modelo eTool.

Os resultados indicam que o concreto é o principal material responsável pelo GWP total dos galpões logísticos, representando, em média, 63,1% das emissões no cenário Baseline. O aço aparece como o segundo material mais relevante, com participação média de 29,2%, enquanto os demais materiais somados representam apenas 7,7% do GWP total. Essa distribuição evidencia que o desempenho ambiental da tipologia está fortemente condicionado por dois grupos materiais principais: concreto e aço.

A análise por sistema construtivo complementa essa leitura ao mostrar onde esses materiais estão concentrados na edificação. A superestrutura responde, em média, por 47,4% do GWP total, seguida pelo piso industrial, com 24,2%, e pelo sistema de fundações, com 22,0%. A envolvente, composta por paredes, aberturas e fechamentos, apresenta participação substancialmente menor, de 4,8%. Esses resultados são coerentes com as características físicas dos galpões logísticos, nos quais grandes vãos, pisos industriais extensos e fundações robustas determinam elevada demanda por materiais estruturais.

Para facilitar a comparação visual entre os principais materiais, o Gráfico 5 sintetiza a participação média do concreto, do aço e dos demais materiais no GWP total do cenário Baseline.

Gráfico 5 – Participação média dos principais materiais no GWP total



Fonte: Elaborado pelo autor com base no banco de dados da pesquisa, 2026.

Nota: Massas médias por m² GFA: concreto = 3.775 kg/m²; aço = 230 kg/m² (razão mássica concreto/aço ≈ 16:1).

4.3.2 O papel do concreto: massa versus intensidade carbônica

A participação do concreto no GWP total — em média 63,1% — pode parecer surpreendente à primeira leitura, uma vez que a intensidade carbônica do concreto (65,1 kgCO₂e/t) é cerca de 6,8 vezes menor do que a do aço (442,5 kgCO₂e/t). A aparente contradição se dissolve quando se examina a razão mássica entre os dois materiais: a massa de concreto por m² de área construída (3.775 kg/m²) é cerca de 16 vezes superior à de aço (230 kg/m²). A contribuição ao GWP de cada material resulta, portanto, do produto entre intensidade e quantidade: 3.775 kg/m² × 65,1 kgCO₂e/t ≈ 246 kgCO₂e/m², contra 230 kg/m² × 442,5 kgCO₂e/t ≈ 102 kgCO₂e/m² para o aço — uma razão de aproximadamente 2,4:1 no impacto absoluto, que se reflete na razão de participação percentual de 63,1% a 29,2%.

O achado de que o concreto 30 MPa Portland representa isoladamente 54,5% do GWP absoluto de toda a amostra aponta para o elemento de maior alavancagem de descarbonização nesta tipologia: a substituição do clínquer Portland por materiais cimentícios suplementares no traço específico desse concreto é capaz de modificar a maior parcela individual de emissões com uma única intervenção técnica.

4.3.3 Estabilidade da intensidade carbônica: variação por quantidade, não por eficiência

O coeficiente de variação da intensidade carbônica do concreto entre os 19 projetos é de apenas 9,5% — valor notavelmente baixo para um indicador que agrega tipos de concreto com diferentes resistências e composições. Esse resultado revela que os 19 projetos utilizam, em suas condições *Baseline*, formulações de concreto com eficiência ambiental intrinsecamente similar: os diferentes traços aplicados às fundações, pisos e estruturas, quando ponderados pela massa total de concreto por m², convergem para uma intensidade carbônica média próxima a 65 kgCO₂e/t.

A consequência desta constatação é metodologicamente relevante: se a intensidade carbônica do concreto é aproximadamente constante entre projetos, a variação observada no GWP/m² — que é alta (CV=43,3%) — não pode ser atribuída a diferenças na eficiência intrínseca do material, mas sim ao quantitativo de concreto

empregado por m² de área construída. Galpões com maior GWP/m² não usam cimento "pior"; usam mais concreto por m². Esse quantitativo, por sua vez, é determinado pelas decisões de projeto estrutural — especialmente as relativas ao sistema de fundação (profundidade das estacas, número de pontos de apoio, volume dos blocos de coroamento) e à espessura da laje de piso industrial. Esta é a base empírica que sustenta a Hipótese H1 e que será confirmada pela análise de correlações da Seção 4.5.

4.4 Estratégias de redução de carbono incorporado

4.4.1 Eficácia por tipo de estratégia

A Tabela 6 apresenta as estratégias de descarbonização identificadas nos cenários *Design Final*, ordenadas da maior para a menor eficácia relativa. O detalhamento das estratégias efetivamente adotadas em cada um dos 19 galpões, com a descrição individual de cada intervenção, é apresentado no Apêndice C.

Tabela 6 – Estratégias de redução GWP: abrangência e eficácia.

Estratégia	Projetos (n)	Redução típica por estratégia	Eficácia
Substituição de cimento por BFS — Fundações	8	7% a 16%	ALTA
Substituição de cimento por BFS — Piso industrial	6	6% a 10%	ALTA
EPD específica — Cimento CPII E40 Votorantim	3	8% a 15%	ALTA
EPD específica — Barras de Aço ArcelorMittal	4	2% a 5%	MÉDIA
Otimização de espessura/traço do piso industrial	4	1% a 3%	MÉDIA
Aço reciclado (cobertura / telha metálica)	5	0,8% a 2%	BAIXA
Agregados reciclados	1	~1%	MUITO BAIXA

Fonte: Elaborado pelo autor com base no banco de dados da pesquisa, 2026.

A análise da Tabela 6 confirma o caráter hierárquico das estratégias de descarbonização: as duas intervenções de maior eficácia — substituição de cimento por BFS em fundações (7–16%) e em piso industrial (6–10%) — são também as mais amplamente adotadas (8 e 6 projetos, respectivamente), refletindo a combinação de maturidade técnica, disponibilidade comercial e elevado potencial de redução que caracteriza a escória de alto-forno no contexto paulista.

A EPD específica do Cimento CII E40 Votorantim, aplicada em 3 projetos com eficácia de 8–15%, merece atenção metodológica: ainda que o número de EPD inseridas formalmente nos modelos eTool seja zero (conforme declarado nos relatórios), a parametrização do modelo com os valores de intensidade carbônica declarados nessa EPD — cujo teor de BFS é superior ao genérico utilizado na biblioteca eTool — produz reduções expressivas, demonstrando que a qualidade dos dados de inventário tem impacto direto nos resultados da ACV. Isso aponta para a importância crescente das EPDs nacionais verificadas como instrumento de precisão metodológica em estudos futuros.

4.4.2 Dominância do concreto nas reduções: 93,5% e razão 4,39:1

O achado mais significativo da análise de estratégias não é a eficácia de nenhuma estratégia individual, mas a assimetria estrutural entre os dois materiais dominantes: em média, 93,5% das reduções de GWP obtidas nos projetos Design Final originam-se de intervenções no concreto, e apenas 6,5% de intervenções no aço e nos demais materiais. Em termos agregados, a razão entre as reduções absolutas atribuíveis ao concreto e ao aço é de 4,39:1.

Esse resultado é consequência direta dos padrões identificados nas seções anteriores: o concreto responde por 63,1% do GWP total e é o único material cujo volume por m² é suficientemente grande para que variações na composição cimentícia — da ordem de 30% a 50% de substituição de clínquer por BFS — gerem reduções absolutas expressivas em kgCO₂e/m². O aço, apesar de sua intensidade carbônica cerca de 6,8 vezes superior à do concreto, contribui com menor massa total e tem acesso mais restrito a estratégias de descarbonização de alta eficácia no contexto brasileiro: a utilização de aço com maior teor de reciclagem (estratégia “Aço Reciclado”) produz reduções de apenas 0,8–2% por projeto.

Em termos práticos, este resultado indica que estratégias voltadas ao aço são complementares, não substitutas, das estratégias voltadas ao concreto. Um projeto que invista apenas em intervenções no aço — por mais amplas que sejam — não é capaz de alcançar o potencial de redução de um projeto que aplique BFS de alta concentração nas fundações e na laje de piso. Esta é a confirmação empírica da Hipótese H2, discutida mais detalhadamente na Seção 4.5.

4.4.3 O paradoxo da eficiência: qualidade supera quantidade

A comparação entre o galpão E04-G4 e os galpões E09-G1 e E09-G2 revela um padrão contraintuitivo: com apenas 1 estratégia, o E04-G4 obteve 26,0% de redução de GWP — resultado que corresponde a 78% da redução máxima observada na amostra (33,4%), alcançada com 8 estratégias no E09-G3. Em termos de eficiência por estratégia, o E04-G4 obteve 26,0% de redução por estratégia, enquanto o E09-G2 (9 estratégias, 33,3% de redução) obteve 3,7% por estratégia.

A explicação desse "paradoxo da eficiência" reside na composição das estratégias: o E04-G4 aplicou BFS em concentração elevada ($\geq 34\%$) nos elementos de fundação de grande volume — o sistema de maior impacto unitário disponível —, enquanto os projetos com maior número de estratégias diversificaram as intervenções por diferentes sistemas e materiais, muitos deles de eficácia unitária mais baixa. A mensagem prática é direta: a concentração estratégica em materiais de alta massa e alta substituíbilidade de clínquer — como as fundações e a laje de piso de grande volume — produz resultados superiores à pulverização de intervenções por múltiplos sistemas de menor potencial relativo. Qualidade e intensidade da estratégia superam, nesta tipologia, o número de intervenções aplicadas.

Este achado é consistente com a recomendação de Mehta e Monteiro (2014) de que estratégias de substituição de clínquer em peças de grande volume — como blocos de fundação — oferecem o maior potencial de impacto ambiental por decisão de projeto, tanto pela magnitude do volume envolvido quanto pela adequação técnica do concreto com BFS nessas aplicações (menor calor de hidratação, maior durabilidade).

4.5 Análise de correlações estatísticas

4.5.1 Correlações com o GWP/m² *Baseline*: identificação dos preditores

O Quadro 5 apresenta os coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis físicas, construtivas e de otimização dos projetos e o GWP/m² *Baseline*. O critério de significância adotado é $p < 0,05$, com a seguinte notação: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

Quadro 5 - Correlações de Pearson com o GWP/m² *Baseline* (n = 19)

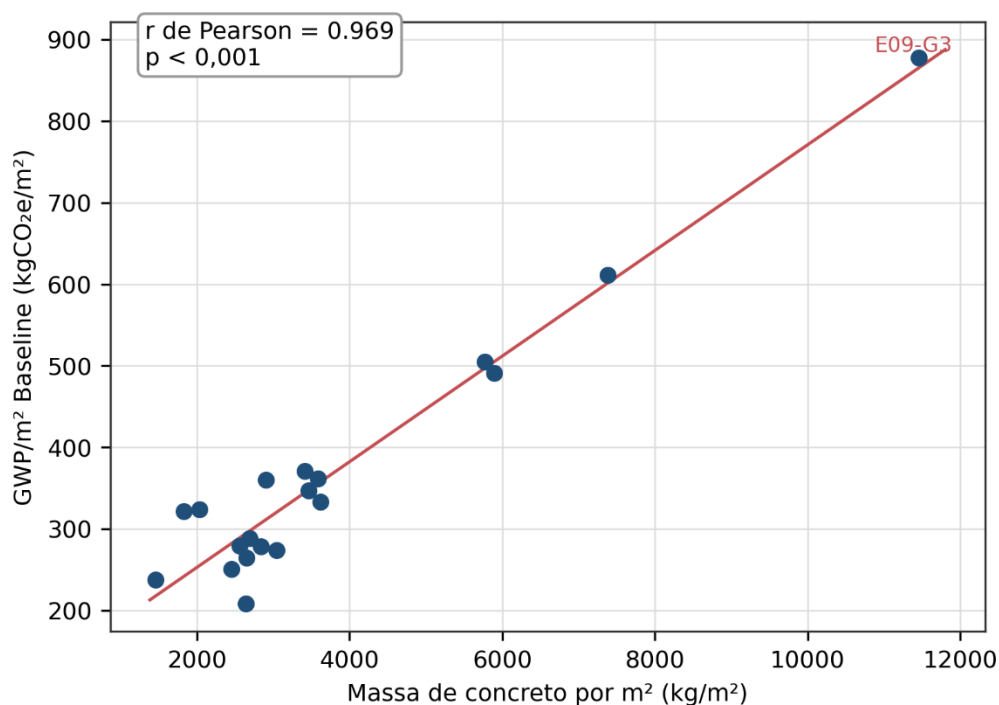
Variável	Pearson <i>r</i>	Interpretação
Massa de concreto / m ² (MassConc_m2)	+0,969***	Predição quase perfeita — confirma H1
Massa total / m ² (Mass_m2)	+0,946***	GWP proporcional à massa total
GWP Design Final / m ² (GWP_F)	+0,944***	Alta persistência pós-otimização
% GWP Fundações (pct_Fund)	+0,841***	Fundações como fator de risco estrutural
% GWP Concreto (pct_concreto)	+0,528*	Associação moderada
% Redução GWP (Red_GWP_pct)	+0,406 (n.s.)	$p = 0,085$
% Piso industrial (pct_Piso)	+0,166 (n.s.)	$p = 0,496$
Área construída (Area_m2)	-0,399 (n.s.)	$p = 0,090$; significativa em postos ($p = -0,537^*$)
% Superestrutura (pct_Sup)	-0,548*	Associação inversa moderada
% Aço (pct_Aco)	-0,442 (n.s.)	$p = 0,058$
Nº de estratégias (N_Estrategias)	+0,182 (n.s.)	$p = 0,456$

Fonte: Elaborado pelo autor com base no banco de dados da pesquisa, 2026.

A correlação r (MassConc_m2, GWP_B) = +0,969 — coeficiente que representa associação linear quase perfeita, ilustrada no Gráfico 6 — é o resultado

estatístico mais relevante desta pesquisa e confirma a Hipótese H1 com ampla margem em relação ao limiar estabelecido ($r > 0,90$). A massa de concreto por metro quadrado de área construída é, de forma inequívoca, o principal preditor do GWP/m² nesta tipologia: projetos com maior quantidade de concreto por m² apresentam sistematicamente maior carbono incorporado, independentemente de outros fatores. Esse resultado operacionaliza, em termos estatísticos, o argumento qualitativo desenvolvido na Seção 4.3.3: a variação no GWP/m² é explicada pelo quantitativo do material, não por diferenças em sua eficiência intrínseca.

Gráfico 6 – Massa de concreto por m² versus GWP/m² Baseline, com reta de tendência



Fonte: Elaborado pelo autor com base no banco de dados da pesquisa, 2026.

A correlação r (GWP_F, GWP_B) = +0,944 — denominada neste trabalho de persistência pós-otimização — revela uma implicação estratégica de considerável importância: projetos com alto GWP no Baseline tendem a manter GWP elevado mesmo no Design Final. As estratégias de descarbonização disponíveis são suficientes para reduzir o GWP em até um terço, mas não para equalizar o desempenho de projetos estruturalmente distintos. Em outras palavras, um galpão que nasce com 877 kgCO₂e/m² dificilmente chegará, com estratégias disponíveis no mercado atual, ao mesmo patamar de um galpão que parte de 209 kgCO₂e/m². Isso

reforça a relevância de incorporar a lógica do carbono incorporado ainda na fase de concepção do projeto — antes da definição do sistema estrutural e do sistema de fundações —, e não apenas na fase de especificação de materiais.

As correlações negativas do GWP/m² Baseline com a participação da superestrutura ($r = -0,548$), com a participação do aço ($r = -0,442$) e com a área construída em escala logarítmica ($r = -0,574$; $p = 0,010$) refletem um mesmo padrão estrutural: projetos em que o peso relativo da superestrutura ou do aço é maior são projetos em que, por consequência, o peso relativo das fundações é menor — e fundações profundas em grande volume são o principal vetor de GWP elevado nesta tipologia. Em outras palavras, essas correlações negativas não indicam que mais superestrutura ou mais aço sejam intrinsecamente favoráveis ao ambiente, mas que sua maior participação percentual sinaliza uma configuração estrutural com menor concentração de GWP em fundações.

A ausência de significância estatística de N_Estrategias sobre o GWP_B ($r = +0,182$; $p = 0,456$) é esperada e confirma que o número de estratégias de descarbonização não determina o nível de carbono incorporado do Baseline — o que seria um resultado absurdo, já que as estratégias são definidas em resposta ao Baseline e não têm efeito retroativo sobre ele.

4.5.2 Correlações com o percentual de redução de GWP

A Tabela 7 apresenta os coeficientes de correlação com a variável de resultado das estratégias de descarbonização.

Tabela 7 – Correlações com o percentual de redução de GWP

Variável	Pearson r	Spearman ρ	p-valor	Interpretação
Nº estratégias (N_Estrategias)	+0,701	+0,690	< 0,001	Preditor dominante da redução
% Superestrutura (pct_Sup)	-0,615	-0,549	0,005	Associação inversa significativa
Massa total / m ² (Mass_m2)	+0,457	+0,532	0,049	Significativa no limite
Pé-direito (Pe_Direito_m)	-0,456	-0,699	0,050	Mais forte em postos ($p = 0,001$)

GWP Baseline (GWP_B)	+0,406	+0,437	0,085	Não significativa (n.s.)
Área construída (Area_m2)	-0,265	-0,447	0,273	Não significativa (n.s.)

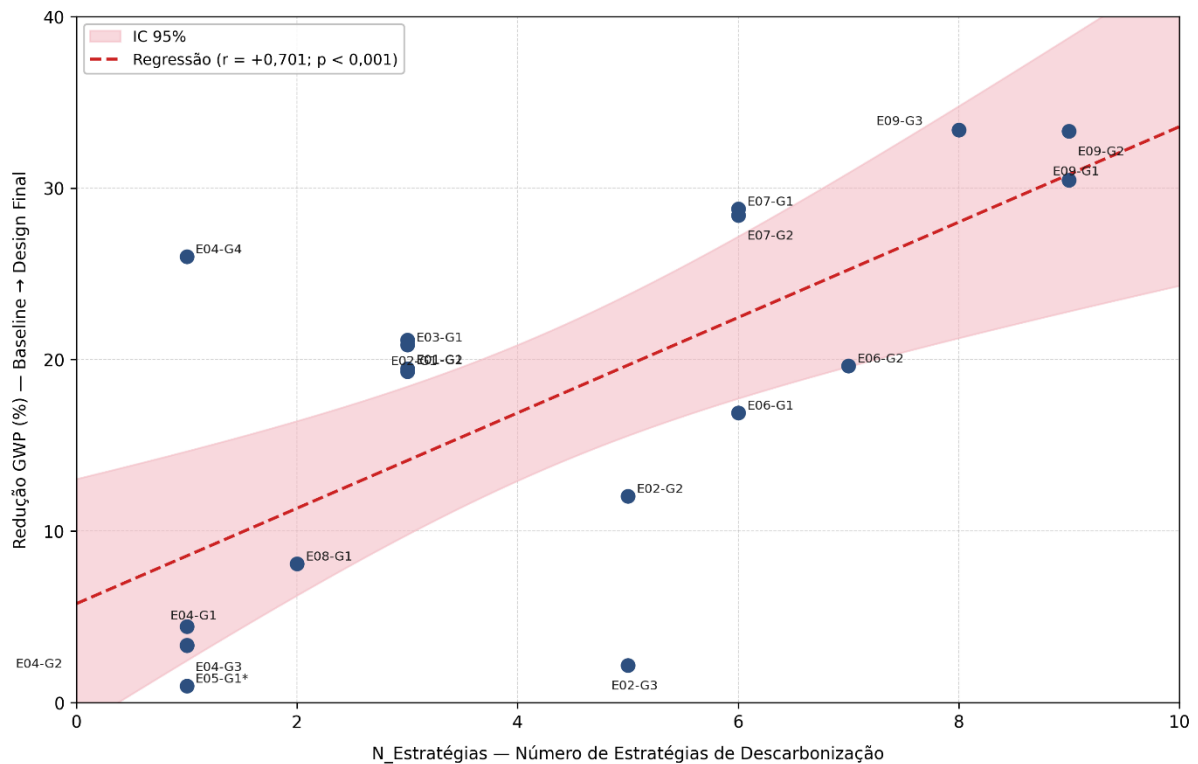
Fonte: Elaborado pelo autor com base no banco de dados da pesquisa, 2026.

O número de estratégias de descarbonização (N_Estrategias) é o preditor mais forte do percentual de redução ($r = +0,701$; $p = +0,690$; $p < 0,001$), o que confirma a lógica fundamental do Design Final: projetos que aplicam mais intervenções de descarbonização obtêm, em média, maiores reduções de GWP. A robustez da associação — com Pearson e Spearman convergindo para valores próximos ($+0,701$ e $+0,690$) — indica que ela não é um artefato da linearidade do coeficiente paramétrico, mas uma relação genuína e estável. A associação mantém-se significativa quando o galpão E05-G1, cujo Design Final possui ressalva metodológica, é excluído da análise ($r = +0,630$; $p = 0,005$; $n = 18$).

A correlação negativa entre percentual de superestrutura e redução obtida ($r = -0,615$; $p = 0,005$) reflete o fato de que galpões com estrutura metálica predominante têm acesso a estratégias de descarbonização de menor eficácia — fundamentalmente a troca por aço com maior teor de reciclagem —, enquanto galpões com maior proporção de concreto nas fundações e no piso podem acessar a substituição por BFS, de eficácia muito superior.

O Gráfico 7 ilustra graficamente a dispersão entre o número de estratégias de descarbonização (N_Estrategias) e a redução percentual do GWP/m², com reta de regressão linear ajustada e intervalo de confiança de 95%. A inclinação positiva da reta e a distribuição dos pontos confirmam a correlação significativa ($r = +0,701$; $p < 0,001$), com destaque para os projetos E09-G1, E09-G2 e E09-G3, que empregaram o maior número de estratégias e alcançaram as maiores reduções da amostra.

Gráfico 7 – Dispersão entre número de estratégias de descarbonização e redução percentual do GWP/m² (n = 19)



Fonte: Elaborado pelo autor com base no banco de dados da pesquisa, 2026. Nota: reta de regressão com IC 95% (banda rosa); $r = +0,701$; $p < 0,001$ (Pearson).

4.5.3 Verificação de robustez: Pearson, Spearman e Kendall

A Tabela 8 apresenta a análise de concordância entre os três coeficientes de correlação para os pares de variáveis de maior relevância analítica; o Gráfico 8 apresenta a matriz completa de correlações de Pearson entre as variáveis analisadas.

Tabela 8 – Concordância entre coeficientes de correlação para pares-chave

Par de variáveis	Spearman ρ	Pearson r	Kendall τ	p-valor	Significativo?
Área vs GWP/m ²	-0,537	-0,399	-0,392	0,018	Sim (apenas em postos)
N_Estrat vs % Redução	+0,690	+0,701	+0,550	< 0,001	Sim (forte)
Massa/m ² vs GWP/m ²	+0,828	+0,946	+0,708	< 0,001	Sim (muito forte)

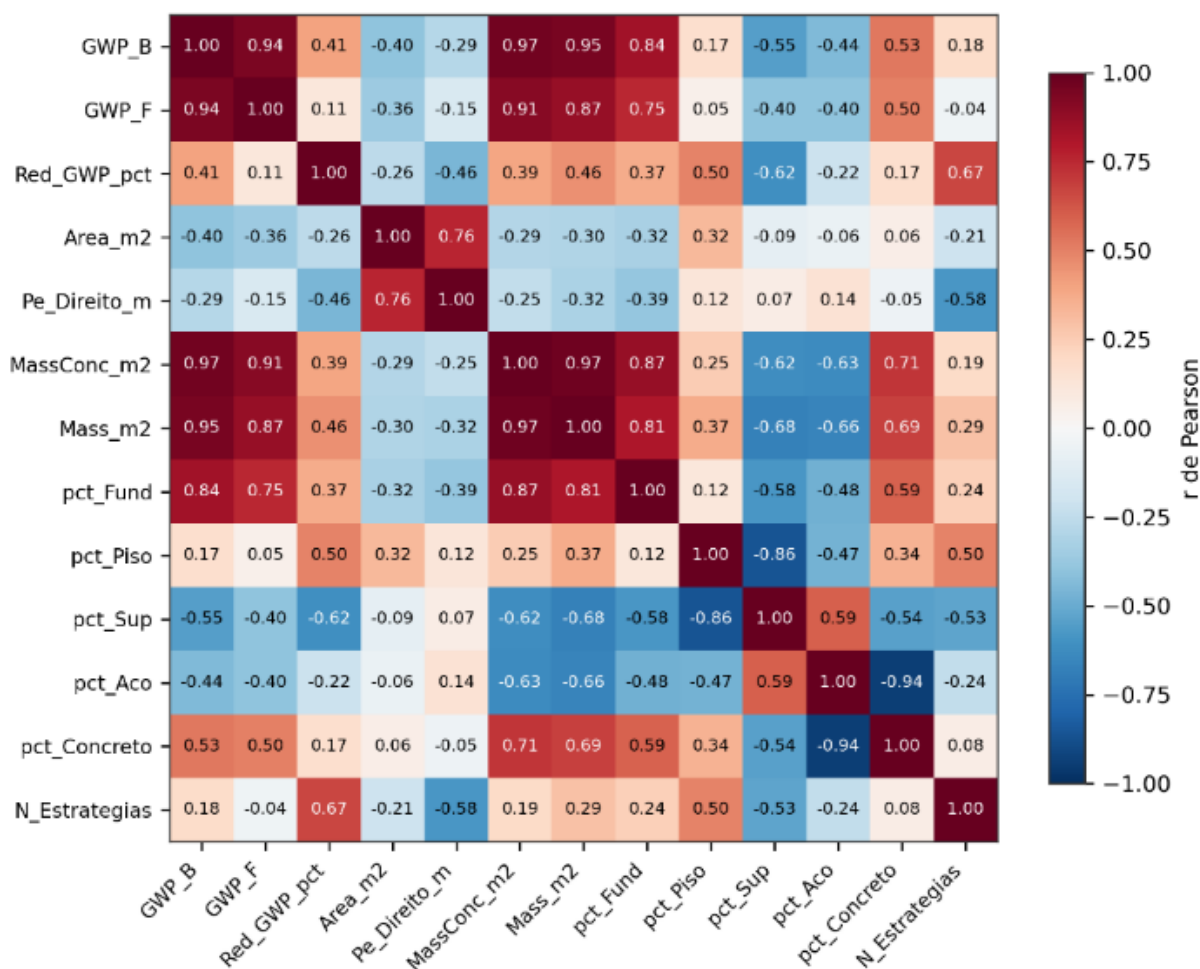
Par de variáveis	Spearman ρ	Pearson r	Kendall τ	p-valor	Significativo?
Massa concreto/m ² vs GWP/m ²	+0,807	+0,969	+0,626	< 0,001	Sim (muito forte)
Pé-direito vs GWP/m ²	-0,326	-0,288	-0,275	0,173	Não (n.s.)
% Concreto vs GWP/m ²	+0,281	+0,528	+0,216	0,244	Parcial (Pearson sig.; Spearman n.s.)

Fonte: Elaborado pelo autor com base no banco de dados da pesquisa, 2026.
 Legenda: n.s. = não significativo ($p \geq 0,05$). Critério de significância: $\alpha = 0,05$.

A concordância entre os três coeficientes é alta para os pares de maior relevância — Massa/m² vs GWP/m² e MassaConcreto/m² vs GWP/m² — com direção consistentemente positiva e p-valores abaixo de 0,001. Para N_Estratégias vs % Redução, a concordância também é robusta (Pearson $r = +0,701$; Spearman $\rho = +0,690$; Kendall $\tau = +0,550$), confirmando que a associação entre abrangência das estratégias e redução obtida não é um artefato paramétrico.

O caso do par Área vs GWP/m² é metodologicamente interessante: o coeficiente de Pearson (-0,399) é substancialmente menor em módulo do que o de Spearman (-0,537), o que indica que a relação entre área e GWP não é perfeitamente linear — há uma curvatura que o modelo log-log, analisado na Seção 4.6, captura mais adequadamente. A significância estatística da correlação de Spearman ($p = 0,018$) confirma a existência do efeito de escala mesmo com $n = 19$.

Gráfico 8 – Matriz de correlações de Pearson entre as variáveis analisadas (n = 19)



Fonte: Elaborado pelo autor com base no banco de dados da pesquisa, 2026.

Nota: pct_Piso considera nulo o GWP de piso nos projetos sem categoria própria de piso no modelo eTool (6 de 19 casos).

O par % Concreto vs GWP/m² exibe o que pode ser classificado como resultado “parcial”: Pearson $r = +0,528$ é significativo ($p = 0,020$), mas Spearman $\rho = +0,281$ não é ($p = 0,244$). Isso sugere que a relação entre a participação percentual do concreto no GWP total e o valor absoluto de GWP/m² é moderada e pode estar influenciada por casos atípicos, tornando-a menos robusta do que a correlação entre a massa de concreto e o GWP/m². De modo análogo, o par Área vs GWP/m² é significativo nos coeficientes de postos ($\rho = -0,537$, $p = 0,018$; $\tau = -0,392$, $p = 0,019$), mas não no coeficiente de Pearson ($r = -0,399$; $p = 0,090$) — assimetria esperada em presença de outlier e que antecipa a pertinência da transformação logarítmica adotada na análise de regressão da Seção 4.6.

4.6 Efeito de escala: análise de regressão log-log

4.6.1 Resultados do modelo de regressão

Para investigar a Hipótese H3, estimou-se o modelo de regressão log-log especificado na Seção 3.6.3. A Tabela 9 apresenta os resultados e o Gráfico 8 ilustra o ajuste do modelo aos dados.

Tabela 9 – Resultados da regressão log-log: $\ln(\text{GWP_B/m}^2) \sim \ln(\text{Área construída})$

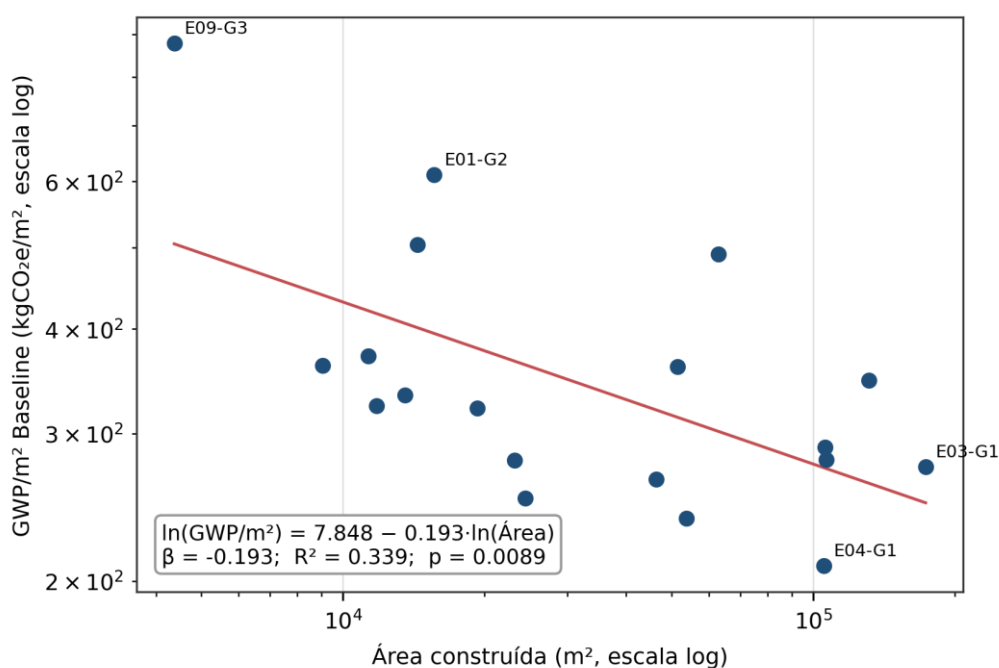
Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Estatística <i>t</i>	p-valor
Intercepto (α)	7,848	0,683	11,49	< 0,001
Elasticidade (β)	-0,194	0,065	-2,95	0,009
R ²	0,339	—	—	—
R ² ajustado	0,300	—	—	—
n	19	—	F(1; 17) = 8,73	0,009

Fonte: Elaborado pelo autor com base no banco de dados da pesquisa, 2026.

A equação estimada é:

$$\ln(\text{GWP_B/m}^2) = 7,848 - 0,194 \cdot \ln(\text{Área_m}^2)$$

Gráfico 9 – Relação entre área construída e GWP/m² Baseline em escala log-log, com reta de regressão



Fonte: Elaborado pelo autor com base no banco de dados da pesquisa, 2026.

Nota: estimação por MQO (biblioteca statsmodels, Python 3); rótulos identificam casos extremos da amostra.

4.6.2 Interpretação da elasticidade e do efeito de escala

O coeficiente de elasticidade $\beta = -0,194$ ($p = 0,009$) confirma a existência de um efeito de escala negativo e estatisticamente significativo: galpões de maior área apresentam, em média, menor GWP por metro quadrado de área construída. A interpretação da elasticidade é direta: um aumento de 1% na área construída do galpão corresponde, em média, a uma redução de 0,19% no GWP/m²; de forma mais expressiva, a duplicação da área construída está associada a uma redução média de aproximadamente 12,6% no GWP/m² ($2^\beta - 1 \approx -12,6\%$) — tudo o mais mantido constante.

Esse efeito de escala tem explicação estrutural: em galpões de maior porte, os elementos de alta intensidade carbônica concentrada — especialmente as fundações profundas e os blocos de coroamento de estacas — distribuem-se sobre uma área construída maior, diluindo seu impacto por m². O piso industrial, que apresenta proporção relativamente estável por m², contribui de forma menos escalável para a variação do GWP/m² com o porte do galpão. Assim, a escala favorece a diluição do impacto dos sistemas de fundação, que são os de maior variabilidade absoluta (DP=13,2%) entre os sistemas construtivos analisados.

A Hipótese H3 é, portanto, parcialmente confirmada: a elasticidade estimada ($-0,194$) é negativa, significativa e de magnitude próxima ao valor de referência considerado na hipótese ($\approx -0,20$). O efeito existe e é empiricamente mensurável, embora seu poder explicativo seja moderado — como discutido a seguir.

4.6.3 Limites do modelo e interpretação do R²

O R² de 0,339 indica que a área construída, por si só, explica cerca de 34% da variância do $\ln(\text{GWP}/\text{m}^2)$ na amostra. Os 66% restantes são explicados por outras variáveis não incluídas no modelo: o sistema e a profundidade das fundações, a espessura e a composição da laje de piso, o tipo de cimento utilizado e as condições geotécnicas locais. Esse resultado reforça a mensagem central desta pesquisa: a escala é um fator relevante para o GWP/m², mas não é determinante sozinha. A intensidade do uso de concreto — medida pela massa de concreto por m² ($r = +0,969$ com o GWP/m²) — é um preditor muito mais robusto do carbono incorporado do que a escala do empreendimento.

Em termos práticos, isso implica que não é possível prever o GWP/m² de um galpão apenas por sua área construída. Dois galpões de mesma área podem apresentar perfis de carbono incorporado muito distintos, dependendo das condições do solo (que determinam o sistema e o volume das fundações), da espessura necessária da laje de piso e das escolhas de projeto estrutural. O *benchmark* proposto na Seção 4.7 é, portanto, mais útil do que o modelo de regressão como ferramenta de classificação de desempenho: classifica o projeto com base em seu GWP/m² observado, não em uma previsão derivada da área.

4.7 Proposta de sistema de *benchmark* de carbono incorporado

4.7.1 Limiares de classificação derivados da distribuição empírica

Com base nos percentis P10, P25, P50, P75 e P90 da distribuição do GWP/m² Baseline dos 19 galpões, o sistema de benchmark é estruturado em seis classes de desempenho, conforme o Quadro 6; o Gráfico 10 apresenta a posição de cada galpão nas faixas propostas.

Quadro 6 – Sistema de benchmark de carbono incorporado para galpões logísticos

Classe	Intervalo (kgCO ₂ e/m ²)	Limiar estatístico	Galpões nesta classe (n)	Interpretação
A+	≤ 248	≤ P10	2	Desempenho de excelência — 10% de menor carbono da amostra
A	249 a 276	P10–P25	3	Desempenho muito bom
B	277 a 324	P25–P50	5	Desempenho bom — acima da mediana
C	325 a 366	P50–P75	4	Desempenho médio — abaixo da mediana
D	367 a 526	P75–P90	3	Desempenho abaixo da média setorial

Classe	Intervalo (kgCO ₂ e/m ²)	Limiar estatístico	Galpões nesta classe (n)	Interpretação
E	> 526	> P90	2	Desempenho crítico — 10% de maior carbono da amostra
Total	—	—	19	

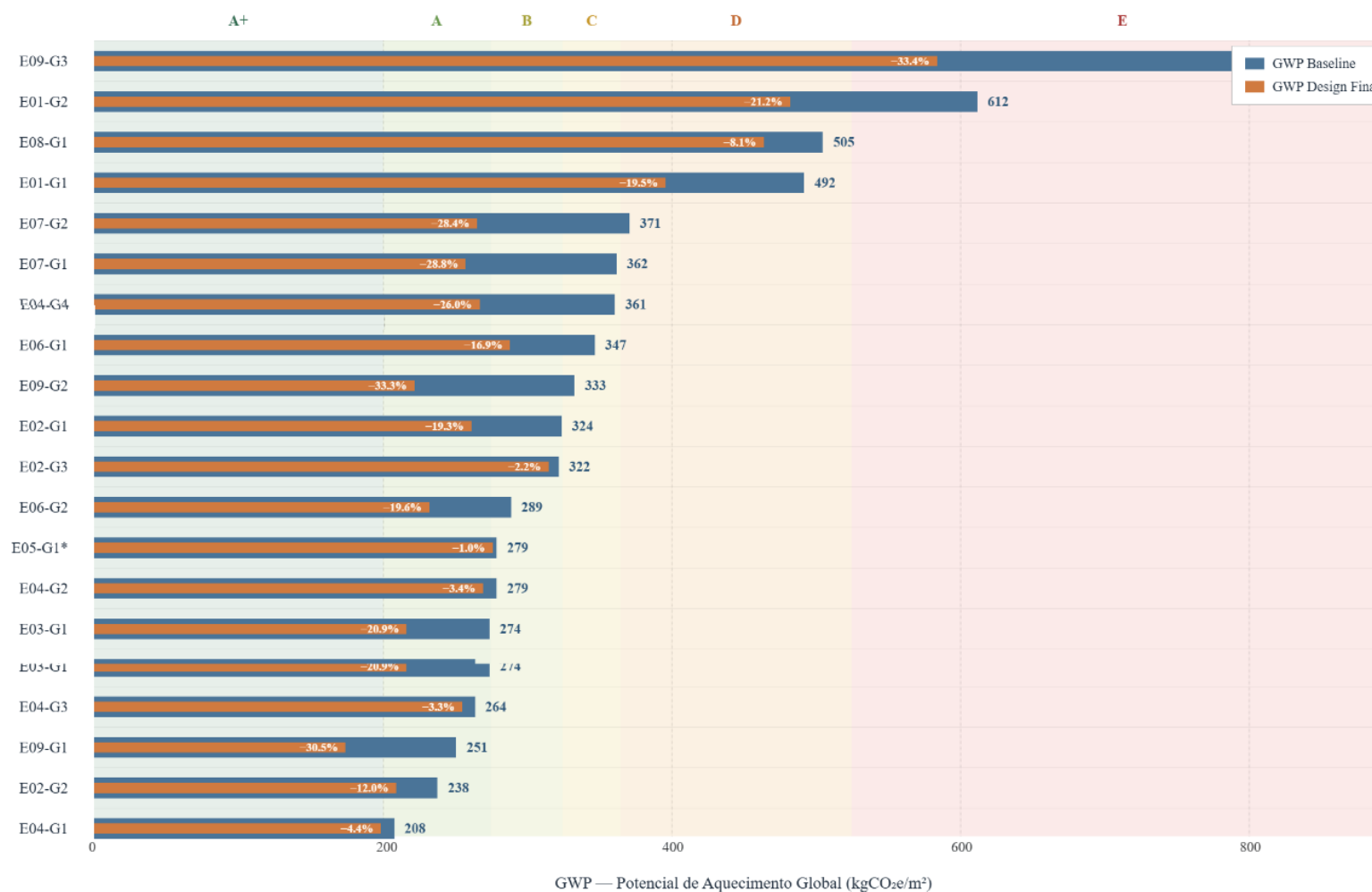
Fonte: Elaborado pelo autor com base no banco de dados da pesquisa, 2026.

Nota: limiares calculados a partir dos percentis da distribuição da amostra de 19 galpões; devem ser recalibrados quando a amostra for ampliada.

Os limiares numéricos — 248, 276, 324, 366 e 526 kgCO₂e/m² — derivam diretamente dos percentis da distribuição observada e não de metas normativas externas. Essa ancoragem empírica confere ao benchmark a propriedade de representar a prática corrente do mercado paulista de galpões logísticos avaliados por ACV com metodologia homogênea, tornando-o um instrumento descritivo da realidade observada — e não uma aspiração normativa desconectada das condições construtivas locais.

O Gráfico 10 posiciona graficamente os 19 galpões nas faixas de classificação benchmark. As bandas coloridas representam as classes A+ a E derivadas dos percentis empíricos, permitindo visualizar simultaneamente o GWP Baseline (barra azul) e o GWP Design Final (barra laranja) de cada projeto — evidenciando a magnitude das melhorias e os casos em que a intervenção de descarbonização promoveu uma mudança de classe.

Gráfico 10 – Posição dos 19 galpões nas faixas do benchmark percentílico (GWP/m² Baseline, kgCO₂e/m²)



Fonte: Elaborado pelo autor com base no banco de dados da pesquisa, 2026.

Nota: bandas coloridas representam as classes benchmark A+ (verde escuro) a E (vermelho), derivadas dos percentis P10, P25, P50, P75 e P90 da distribuição empírica de Baseline. Barras azuis = GWP Baseline; barras laranja = GWP Design Final.

A distribuição dos galpões entre as classes reflete a assimetria da amostra: A+ com 2 projetos (os dois mais eficientes), A com 3, B com 5, C com 4, D com 3 e E com 2 projetos (E01-G2 e o outlier E09-G3). A classe E representa, portanto, situações de condições geotécnicas ou estruturais excepcionais — ou de elevada intensidade de concreto por m² —, que elevam o GWP/m² a patamares muito superiores à prática típica.

4.7.2 Classificação individual dos 19 galpões

A Tabela 10 apresenta a classificação de cada galpão no sistema de benchmark proposto, tanto pelo GWP/m² Baseline quanto pelo Design Final, permitindo visualizar a trajetória de cada projeto no sistema de classes após a aplicação das estratégias de descarbonização. Os dados individuais completos de cada um dos 19 galpões — incluindo localização, área construída, GWP nos dois cenários, percentual de redução e classe atribuída — são apresentados de forma consolidada no Apêndice A.

Tabela 10 – Classificação dos 19 galpões no benchmark de carbono incorporado

Código Galpão	GWP_B (kgCO₂e/m²)	Classe Baseline	GWP_F (kgCO₂e/m²)	Classe Design Final	Red. (%)	Δ classes
E04-G1	208,5	A+	199,2	A+	4,4	=
E02-G2	237,6	A+	209,0	A+	12,0	=
E09-G1	251,1	A	174,6	A+	30,5	↑1
E04-G3	264,4	A	255,5	A	3,4	=
E03-G1	273,8	A	216,7	A+	20,9	↑1
E04-G2	278,7	B	269,4	A	3,3	↑1
E05-G1*	279,1	B	276,4	B	1,0	=
E06-G2	288,9	B	232,2	A+	19,6	↑2
E02-G3	321,9	B	315,0	B	2,2	=
E02-G1	323,9	B	261,4	A	19,3	↑1
E09-G2	333,3	C	222,3	A+	33,3	↑3
E06-G1	347,1	C	288,4	B	16,9	↑1

Código Galpão	GWP_B (kgCO ₂ e/m ²)	Classe Baseline	GWP_F (kgCO ₂ e/m ²)	Classe Design Final	Red. (%)	Δ classes
E04-G4	360,6	C	266,8	A	26,0	↑2
E07-G1	361,8	C	257,7	A	28,8	↑2
E07-G2	371,1	D	265,6	A	28,4	↑3
E01-G1	491,5	D	395,8	D	19,5	=
E08-G1	504,7	D	463,9	D	8,1	=
E01-G2	611,5	E	482,2	D	21,2	↑1
E09-G3	877,3	E	584,3	E	33,4	=

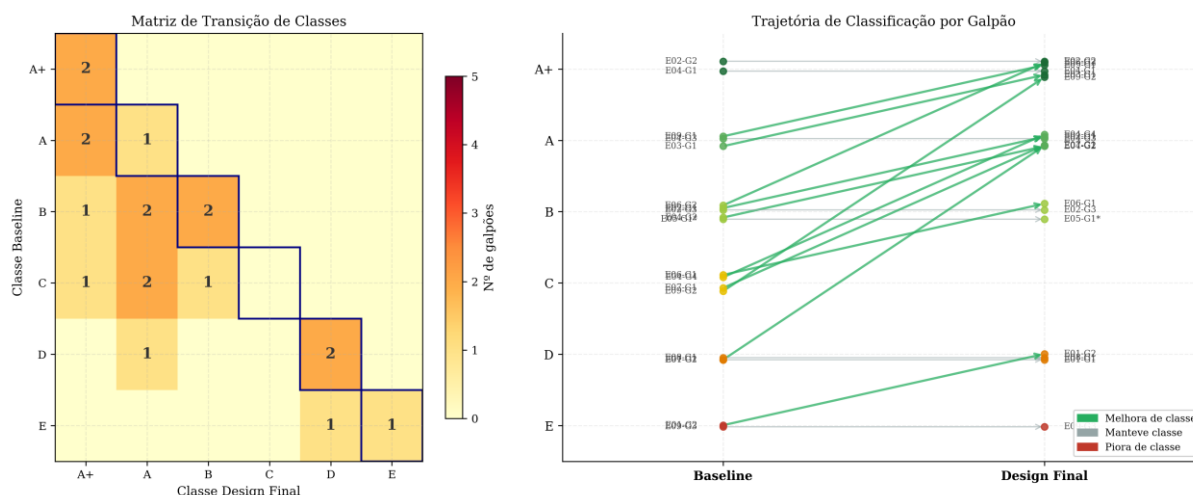
Fonte: Elaborado pelo autor com base no banco de dados da pesquisa, 2026.

4.7.3 Mobilidade entre classes: o *benchmark* como instrumento de avaliação de estratégias

Uma propriedade particularmente útil do sistema de benchmark proposto é sua capacidade de expressar o impacto das estratégias de descarbonização em termos de mobilidade entre classes, ilustrada no Gráfico 11. Os dados da Tabela 10 revelam que as estratégias de descarbonização são capazes de promover melhorias de até três classes — caso do E09-G2, que passa da classe C para a A+, e do E07-G2, que passa da classe D para a A —, o que representa uma mudança de desempenho qualitativa expressiva. Por outro lado, estratégias de baixa eficácia, como a aplicada no E05-G1 (1,0% de redução, 1 estratégia), não são suficientes para alterar a classificação de classe.

O Gráfico 11 sintetiza a mobilidade de classes por duas representações complementares: a matriz de transição (esquerda) contabiliza o número de galpões em cada combinação classe Baseline × classe Design Final; o diagrama de trajetórias (direita) ilustra o caminho individual de cada projeto, evidenciando que 11 dos 19 galpões sobem ao menos uma classe de desempenho após as estratégias de descarbonização adotadas.

Gráfico 11 – Mobilidade de classes entre Baseline e Design Final dos 19 galpões logísticos



Fonte: Elaborado pelo autor. (2026).

Nota: linhas escuras indicam galpões que melhoram de classe; 11 dos 19 galpões sobem ao menos uma classe no Design Final.

Esse comportamento diferenciado torna o *benchmark* útil não apenas como instrumento de diagnóstico ex-post — classificando galpões já construídos ou projetados —, mas também como ferramenta prospectiva de apoio à decisão de projeto: ao simular diferentes combinações de estratégias, o projetista pode estimar antecipadamente quantas classes de melhoria são tecnicamente alcançáveis para um determinado perfil construtivo, orientando o investimento em estratégias de maior impacto.

4.7.4 Discussão: validade, limitações e perspectivas do *benchmark*

O *benchmark* proposto apresenta três características que o distinguem de referências genéricas disponíveis na literatura internacional: (a) é derivado empiricamente de projetos reais avaliados com a mesma metodologia; (b) é específico para a tipologia de galpões logísticos no Estado de São Paulo; e (c) é calibrado para o contexto nacional de disponibilidade de materiais e práticas construtivas.

Suas principais limitações — que devem acompanhar qualquer uso prático do sistema — são o tamanho amostral ($n=19$, caráter exploratório) e a concentração geográfica (Estado de São Paulo). O *benchmark* não deve ser aplicado diretamente a projetos em outros estados sem verificação de comparabilidade das condições

construtivas locais, especialmente no que diz respeito à disponibilidade de BFS para os traços de fundação e piso industrial.

A perspectiva natural de desenvolvimento deste instrumento é a ampliação da base de dados — incorporando estudos de ACV de galpões logísticos de outros estados e de outros consultores, desde que com metodologia compatível — e a revisão periódica dos limiares à medida que o mercado evolui. À medida que práticas como a substituição de BFS se tornam standard de mercado, a distribuição do GWP/m² *Baseline* da tipologia deve se deslocar para a esquerda, e os limiares de cada classe precisarão ser recalibrados para manter sua função discriminatória.

4.8 Síntese dos resultados e verificação das hipóteses de pesquisa

O Quadro 7 apresenta a síntese da verificação das três hipóteses de pesquisa formuladas no Capítulo 1, à luz dos resultados obtidos.

Quadro 7 – Síntese da verificação das hipóteses de pesquisa

Hipótese	Enunciado sintético	Evidência empírica	Resultado
H1	Massa de concreto/m ² é o principal preditor do GWP/m ² ($r > 0,90$)	$r(\text{MassConc_m2, GWP_B}) = +0,969^{***}$; $\rho = +0,807$; $\tau = +0,626$; CV da intensidade carbônica do concreto = 9,5%	CONFIRMADA
H2	Concreto responde por > 90% das reduções e razão concreto:aço > 4:1	Concreto = 93,5% das reduções (média por projeto); razão agregada = 4,39:1	CONFIRMADA
H3	Existe relação inversa e significativa entre área construída e GWP/m ² (efeito de escala)	$\beta = -0,194$ ($p = 0,009$); $R^2 = 0,339$ — efeito significativo, porém de poder explicativo moderado	PARCIALMENTE CONFIRMADA

Fonte: Elaborado pelo autor com base no banco de dados da pesquisa, 2026.

Nota: H3 é classificada como “parcialmente confirmada” porque, embora a elasticidade e a significância correspondam ao previsto, o $R^2 = 0,339$ indica que a área explica cerca de 34% da variância do GWP/m², o que limita o poder preditivo do modelo. O efeito existe e é significativo, mas não é dominante como preditor isolado.

Os três achados, em conjunto, contribuem para caracterizar o perfil de carbono incorporado de galpões logísticos paulistas no contexto analisado. Os resultados indicam a relevância do concreto, especialmente do cimento Portland empregado em fundações e pisos, como principal componente associado às emissões. Também sugerem que a substituição por BFS pode representar uma estratégia relevante de redução, embora seus efeitos variem conforme o sistema estrutural adotado e sejam influenciados pelo efeito de escala. Esse conjunto de conclusões serve de base para as recomendações práticas e para os desdobramentos de pesquisa apresentados no Capítulo 5.

5 DISCUSSÃO

5.1 Síntese dos Principais Achados

Esta pesquisa partiu de uma lacuna concreta: a inexistência, no Brasil, de valores de referência cientificamente fundamentados para o carbono incorporado em galpões logísticos. Para preenchê-la, foram compilados e analisados dados de Avaliação do Ciclo de Vida de 19 edificações logísticas situadas no Estado de São Paulo, produzidos por meio da ferramenta eTool e submetidos a processo de revisão independente. O percurso percorrido ao longo dos quatro capítulos anteriores pode ser sintetizado em sete achados correspondentes aos objetivos específicos estabelecidos na introdução.

Objetivo 1 — Caracterizar a distribuição do GWP/m² nas condições de Baseline. A amostra revelou uma distribuição assimétrica à direita e leptocúrtica — isto é, mais concentrada em torno da média e com caudas mais pesadas do que uma distribuição normal — (skewness = 2,14; kurtosis = 5,25), com média de 367,7 kgCO₂e/m², mediana de 323,9 kgCO₂e/m² e desvio padrão de 159,2 kgCO₂e/m² (CV = 43,3%). O intervalo interquartil (P25–P75 = 276–366 kgCO₂e/m²) concentra a metade central das edificações, enquanto os valores extremos — mínimo de 209 e máximo de 877 kgCO₂e/m² — sinalizam que a tipologia admite desempenho altamente variável conforme escolhas de projeto. A diferença expressiva entre média e mediana (13,5%) reforça a opção metodológica pela mediana e pelos percentis como referências centrais do benchmark.

Objetivo 2 — Quantificar a contribuição de cada módulo do ciclo de vida. O módulo A1–A3 (produção de materiais) responde por 82,4% do GWP total de ciclo de vida nas condições de Baseline (304 kgCO₂e/m²; DP = 4,5 p.p.), confirmando o caráter dominante do carbono incorporado na fase de fabricação. A fase de transporte (A4) contribui com 3,1% (11,9 kgCO₂e/m²), enquanto a reposição de materiais ao longo da vida útil (B4) representa 4,1% (13,8 kgCO₂e/m²). Os módulos de fim de vida (C1+C2+C4) somam 10,4% (38,3 kgCO₂e/m²). Os módulos A5, B1–B3, B5–B7, C3 e D foram classificados como Módulo Não Avaliado (MNA), em conformidade com a prática declarada nos estudos originais.

Objetivo 3 — Identificar os materiais e sistemas construtivos de maior contribuição. O concreto responde por 63,1% do GWP total da amostra, seguido pelo

aço com 29,2%; juntos, esses dois materiais concentram 92,3% do impacto. No nível de sistema construtivo — segundo o mapeamento de categorias do modelo eTool adotado nesta pesquisa —, a superestrutura representa, em média, 47,4% do GWP, o piso industrial 24,2% e as fundações 22,0%; os percentuais não somam 100% porque parte dos elementos é classificada em categorias transversais ou complementares do modelo. A intensidade carbônica do concreto (65,1 kgCO₂e/t; CV = 9,5%) apresenta variabilidade baixa, indicando que a composição dos traços varia entre projetos dentro de um intervalo coerente.

Objetivo 4 — Avaliar a eficácia das estratégias de descarbonização adotadas. A redução média observada entre Baseline e Design Final foi de 17,5% (mediana = 19,5%), com intervalo de 1,0% a 33,4%. A escória de alto-forno (BFS/GGBS) — aplicada em fundações em 8 projetos (reduções de 7%–16%) e em piso industrial em 6 projetos (6%–10%) — constitui a estratégia de maior eficácia e maior frequência de adoção. A especificação de EPDs de cimento (CPII E40 Votorantim: 3 projetos, 8%–15%) e de aço (ArcelorMittal: 4 projetos, 2%–5%) e a otimização de espessura de piso (4 projetos, 1%–3%) compõem o segundo nível de eficácia do portfólio observado.

Objetivo 5 — Verificar correlações entre variáveis de projeto e intensidade carbônica. A correlação entre massa de concreto por m² e GWP/m² Baseline é a mais forte observada ($r = +0,969$; $p < 0,001$), seguida pela correlação entre massa total por m² e GWP/m² ($r = +0,944$; $p < 0,001$). Ambas foram robustamente verificadas pelos três coeficientes (Pearson, Spearman e Kendall), afastando a hipótese de que o resultado seja artefato de outliers ou de não normalidade da distribuição. A correlação entre número de estratégias de descarbonização e redução percentual do GWP ($r = +0,701$; $p = +0,690$; $p < 0,001$) é positiva e significativa, confirmando que portfólios mais amplos de estratégias tendem a produzir maiores reduções.

Objetivo 6 — Investigar o efeito de escala sobre a intensidade de carbono. A regressão log-log entre área construída e GWP/m² Baseline estimou elasticidade $\beta = -0,194$ ($p = 0,009$; $R^2 = 0,339$), indicando que a duplicação da área construída está associada, em média, a uma redução de aproximadamente 12,6% no GWP/m². O efeito de escala existe e é estatisticamente significativo, mas explica apenas cerca de um terço da variância do indicador — o que reforça a primazia das decisões de projeto estrutural sobre o porte do empreendimento.

Objetivo 7 — Propor um sistema de benchmark baseado na distribuição empírica da amostra. O sistema de seis faixas (A+ a E) derivado dos percentis empíricos P10, P25, P50, P75 e P90 da distribuição Baseline — com limiares de 248, 276, 324, 366 e 526 kgCO₂e/m² — classifica qualquer galpão logístico paulista em relação à prática corrente do mercado avaliada com metodologia homogênea, e expressa o efeito das estratégias de descarbonização em termos de mobilidade entre classes (11 dos 19 galpões melhoram de classe no Design Final).

5.2 Verificação das Hipóteses de Pesquisa

Três hipóteses orientaram o delineamento desta pesquisa. Todas receberam avaliação empírica baseada nos dados consolidados, e os resultados permitem os seguintes vereditos:

H1 — "A massa de concreto por m² é o principal preditor da intensidade carbônica (GWP/m²) dos galpões logísticos, com correlação positiva e forte."

Confirmada. O coeficiente de correlação de Pearson entre massa de concreto por m² e GWP/m² Baseline é $r = +0,969$ ($p < 0,001$), o maior valor observado entre todos os pares de variáveis testados. A confirmação por Spearman ($\rho = +0,807$) e Kendall ($\tau = +0,626$) afasta dúvidas sobre a robustez do resultado. A hipótese é, portanto, confirmada: em galpões logísticos, a quantidade de concreto consumida por unidade de área é o fator estruturante do desempenho de carbono incorporado.

H2 — "As estratégias de descarbonização estão concentradas no concreto, respondendo por proporção superior a 80% das reduções absolutas de GWP."

Confirmada. As estratégias associadas ao concreto respondem, em média, por 93,5% das reduções de GWP observadas entre Baseline e Design Final, e a razão agregada concreto:aço nas reduções é de 4,39:1. O limiar de 90% estipulado na hipótese foi superado, assim como a razão mínima de 4:1. Esse resultado é coerente com a dominância do concreto no impacto total e com a disponibilidade, no mercado brasileiro, de tecnologias de substituição de clínquer — especialmente BFS/GGBS — em estágio comercialmente maduro para fundações e pisos industriais.

H3 — "Existe relação inversa e estatisticamente significativa entre o porte da edificação (área em m²) e a intensidade carbônica (GWP/m²)."

Parcialmente confirmada. A elasticidade estimada é negativa e estatisticamente significativa ($\beta = -0,194$; $p = 0,009$), confirmando a existência e a

direção do efeito de escala previsto. Entretanto, o poder explicativo do modelo é moderado ($R^2 = 0,339$): a área construída explica cerca de um terço da variância do GWP/m², de modo que o porte do empreendimento, isoladamente, não permite prever o desempenho de carbono incorporado de um galpão. A hipótese é confirmada quanto à existência e direção do efeito, mas não quanto a um eventual papel dominante da escala como preditor.

5.3 Contribuições Científicas e Práticas

5.3.1 Contribuições ao Conhecimento Científico

Primeiro *benchmark* empírico nacional para carbono incorporado em galpões logísticos. Esta pesquisa produz a primeira base de dados homogênea — mesma ferramenta, mesmo método de caracterização, mesmo escopo de módulos e mesma unidade funcional — para carbono incorporado em galpões logísticos brasileiros. A homogeneidade metodológica distingue este trabalho de compilações bibliográficas internacionais, onde a comparabilidade é limitada por diferenças de escopo, fronteiras do sistema e métodos de caracterização. O sistema de seis faixas derivado empiricamente preenche uma lacuna que permanecia aberta mesmo após duas décadas de crescimento acelerado do setor logístico nacional.

Quantificação da elasticidade escala-carbono. A estimativa da elasticidade de $-0,194$ pela regressão log-log avança o entendimento sobre como o porte da edificação afeta a intensidade carbônica em uma tipologia específica. Embora estudos internacionais reportem efeitos de escala em edificações residenciais e comerciais, a evidência para galpões logísticos em contexto tropical e com estrutura predominantemente pré-moldada era praticamente inexistente na literatura revisada.

Verificação da dominância do concreto como preditor ($r = +0,969$). A força da correlação entre massa de concreto por m² e GWP/m² — confirmada pelos coeficientes paramétrico e não paramétricos — é uma contribuição metodológica de interesse para pesquisadores que buscam indicadores simplificados de triagem de carbono na fase de concepção. O resultado sugere que, para galpões logísticos de estrutura pré-moldada, a estimativa da massa de concreto por m² pode funcionar como proxy confiável do desempenho de carbono incorporado já nas fases iniciais do projeto, antes da especificação detalhada de materiais.

Paradoxo de eficiência estratégica. A correlação positiva entre número de estratégias e redução percentual ($\rho = +0,690$) coexiste com uma variabilidade considerável: projetos com o mesmo número de estratégias exibem reduções que diferem em até 23 pontos percentuais. Esse achado sugere que a mera adoção de mais estratégias não garante maior eficácia — a composição, a escala de aplicação e a interação entre estratégias são igualmente relevantes. Trata-se de uma contribuição que desafia abordagens puramente contabilísticas de descarbonização e aponta para a necessidade de análise integrada do portfólio de estratégias.

5.4 Contribuições à Prática Profissional e Setorial

Instrumento de classificação imediata de projetos. O benchmark proposto permite que projetistas, incorporadores e consultores posicionem qualquer galpão logístico paulista em relação à prática corrente do mercado a partir de um único indicador: um projeto com GWP/m² Baseline igual ou inferior a 248 kgCO₂e/m² já dispõe de evidência de que está entre os 10% mais eficientes da prática atual paulista; um projeto acima de 526 kgCO₂e/m² situa-se entre os 10% de maior impacto e demanda revisão das decisões estruturais e de fundação.

Orientação prioritária de esforço de descarbonização. A demonstração de que, em média, 93,5% das reduções obtidas residem no concreto — e de que BFS em fundações e pisos industriais é a estratégia de maior frequência e eficácia — oferece uma hierarquia de prioridade operacionalmente clara para equipes de projeto. Em contexto de restrições de tempo e custo, esse resultado orienta onde o esforço técnico produz maior retorno em redução de carbono.

Referencial para certificações e requisitos contratuais. O sistema de faixas pode ser adotado como critério complementar em processos de certificação ambiental (AQUA-HQE, LEED, EDGE) ou em cláusulas ESG de contratos de locação de ativos logísticos — um mercado em que a demanda por transparência de impacto ambiental cresce rapidamente, impulsionada por locatários com metas de net-zero e por fundos de investimento imobiliário sujeitos a regulações de divulgação de ESG.

Base para atualização periódica. A estrutura metodológica adotada — banco de dados consolidado, scripts Python documentados, critérios de inclusão explícitos — foi concebida para facilitar a atualização anual ou bienal do *benchmark* à

medida que novos estudos de ACV forem produzidos no país. O sistema não é um valor fixo, mas um instrumento dinâmico calibrado à prática real do mercado.

5.5 Limitações Reconhecidas

A interpretação dos resultados desta pesquisa deve considerar um conjunto de limitações metodológicas e contextuais que condicionam o alcance das inferências.

Tamanho amostral ($n = 19$) e caráter exploratório. Dezenove edificações constituem uma amostra exploratória adequada para os objetivos desta pesquisa, mas insuficiente para inferência estatística com elevada potência. Testes de correlação com $n = 19$ apresentam intervalos de confiança amplos — uma correlação de $r = 0,969$ tem intervalo de confiança de 95% aproximado de $[0,92; 0,99]$, o que ainda é estreito, mas correlações moderadas como $r = +0,701$ têm intervalos compatíveis com valores tão baixos quanto 0,30. O modelo de regressão, com apenas uma variável explicativa e $n = 19$ observações, deve ser interpretado como uma primeira aproximação exploratória do efeito de escala, e não como instrumento preditivo.

Concentração geográfica no Estado de São Paulo. Todos os 19 galpões estão situados em São Paulo, o que reflete tanto o peso do estado na logística nacional quanto a disponibilidade de dados de ACV. Contudo, essa concentração limita a generalização para outras regiões brasileiras, cujas matrizes de transporte, disponibilidade de materiais regionais e práticas construtivas diferem significativamente. Em particular, estados com maior disponibilidade de calcário de baixo teor de MgO (favorável à produção de cimento de alto desempenho) ou com acesso mais limitado a BFS podem apresentar distribuições de GWP substancialmente distintas.

Ausência de relevância geográfica verificada. A falha de *Geographical Relevancy* em todos os 19 estudos — decorrente do uso de inventários australianos e europeus como proxy para o contexto brasileiro — introduz incerteza sistemática nas intensidades carbônicas absolutas. Esse resultado não invalida as comparações relativas entre projetos (pois todos compartilham o mesmo inventário) nem as correlações e o *benchmark* interno, mas impede a comparação direta com *benchmarks* internacionais que utilizem inventários locais.

Ausência de EPDs nacionais nos modelos. Nenhum dos 19 estudos incorporou Declarações Ambientais de Produto (EPDs) de fornecedores brasileiros de

materiais. O uso de dados genéricos de inventário reduz a precisão das estimativas absolutas e pode sistematicamente subestimar ou superestimar o GWP de materiais cuja produção nacional difere dos padrões europeus ou australianos — notadamente concreto usinado, aço estrutural e painéis de fechamento.

Cenários Design Final sem revisão independente concluída. — Até o fechamento desta pesquisa, 15 dos 19 estudos contavam com revisão independente concluída. Os cenários Design Final dos galpões E05-G1, E09-G1, E09-G2 e E09-G3 não possuíam verificação independente finalizada. Por essa razão, os indicadores de eficácia das estratégias associados a esses casos são reportados com ressalva e, quando pertinente, as análises são replicadas com sua exclusão, considerando amostra reduzida de $n = 15$.

Módulos não avaliados (MNA). A exclusão de A5 (canteiro de obras), B1–B3, B5–B7 e C3 do escopo dos estudos originais significa que o GWP total de ciclo de vida reportado é uma subestimativa do impacto completo. Embora A1–A3 domine a contribuição e os módulos MNA sejam tipicamente menores em edificações de uso intensivo de materiais, a inclusão de A5 — impacto de canteiro, desperdício e transporte interno — poderia alterar a hierarquia relativa entre tipologias de projeto.

Heterogeneidade de porte e geometria. A amplitude de área construída (4.376–173.436 m²) e de pé-direito (10,0 m a 17,3 m) na amostra, embora representativa da diversidade do mercado logístico paulista, introduz heterogeneidade estrutural que dificulta a atribuição causal de diferenças de GWP a decisões específicas de projeto. O pé-direito, em particular, afeta diretamente a proporção pilares/laje e, portanto, a intensidade de concreto — uma variável que mereceria modelagem explícita em estudos com amostras maiores.

5.6 Recomendações para Pesquisas Futuras

Os resultados desta pesquisa abrem cinco direções prioritárias para a agenda de investigação sobre carbono incorporado em galpões logísticos no Brasil.

Expansão amostral e cobertura nacional. A consolidação do *benchmark* requer a ampliação da base de dados para pelo menos 50 edificações, com representação de outras unidades federativas — especialmente Rio de Janeiro, Minas Gerais, Paraná e estados do Nordeste, onde o mercado logístico cresce aceleradamente. A inclusão de galpões de outras regiões permitirá verificar se o efeito

de escala (elasticidade $-0,194$) é robusto nacionalmente ou específico ao contexto paulista. A expansão também aumentaria a potência estatística dos modelos de correlação e regressão, reduzindo os intervalos de confiança atualmente amplos

Desenvolvimento e incorporação de EPDs nacionais. A ausência de EPDs de fornecedores brasileiros nos modelos existentes constitui a principal lacuna de qualidade de dados desta pesquisa. Recomenda-se que estudos futuros priorizem a utilização de EPDs de concreto usinado, aço estrutural e painéis de vedação produzidos e verificados no Brasil, em conformidade com a NBR ISO 14025 (ABNT, 2015). A criação de um banco de dados nacional de EPDs para materiais de construção — análogo ao EC3 (*Embodied Carbon in Construction Calculator*) norte-americano ou ao OEKOBAUDAT alemão — é uma condição necessária para a plena representatividade geográfica dos estudos de ACV nacionais.

Comparação entre carbono incorporado e carbono operacional. Esta pesquisa concentrou-se exclusivamente no carbono incorporado (módulos A1–A3, A4, B4, C1, C2, C4). A comparação com o carbono operacional — emissões associadas ao consumo de energia durante a fase de uso (módulos B6 e B7) — é fundamental para avaliar o peso relativo das duas categorias ao longo da vida útil de 60 anos. Em contexto de descarbonização acelerada da matriz elétrica brasileira, o carbono operacional tende a diminuir, elevando a participação relativa do incorporado e tornando este estudo cada vez mais relevante para a estratégia climática setorial.

Investigação de estratégias complementares. O portfólio de estratégias observado na amostra é dominado por BFS/GGBS e EPDs de concreto. Pesquisas futuras deveriam investigar o potencial de estratégias ainda pouco adotadas no mercado brasileiro: concreto com resíduos de cerâmica calcinada (metacaulim), redução de coeficiente de utilização de pilares por otimização topológica, sistemas de cobertura com materiais de menor intensidade carbônica, e substituição de vergalhão convencional por vergalhão reciclado de alto grau. A modelagem comparativa dessas alternativas em estudos de caso reais ampliaria significativamente o portfólio de opções disponíveis para projetistas.

Atualização periódica do *benchmark* e criação de série histórica. O *benchmark* proposto nesta pesquisa reflete a prática do mercado paulista até o momento da coleta dos dados. Recomenda-se sua atualização bienal, à medida que novos estudos de ACV forem produzidos, de forma a acompanhar a evolução das

práticas de projeto e das intensidades carbônicas dos materiais. A criação de uma série histórica de *benchmarks* anuais permitiria monitorar o progresso setorial em direção a metas de descarbonização — fornecendo evidência objetiva sobre se o mercado está, de fato, reduzindo o carbono incorporado de seus ativos ao longo do tempo. Essa série histórica, articulada com as metas do Acordo de Paris e com os compromissos voluntários de grandes locatários logísticos, tem o potencial de se tornar um instrumento de política pública e de regulação setorial.

6. CONCLUSÃO

Enquanto engenheiros civis, somos agentes transformadores do ambiente construído em que atuamos. Nossa missão ultrapassa a entrega de estruturas seguras e funcionais: consiste em produzir soluções de engenharia que efetivamente ampliem a qualidade de vida das pessoas, sintetizando, em uma mesma decisão de projeto, prazo, custo, qualidade e sustentabilidade. Os recursos naturais que sustentam a construção civil são finitos, e cabe à engenharia — e não apenas ao discurso ambiental — traduzir essa restrição em evidências técnicas e metodologias específicas capazes de reduzir, de forma mensurável, o impacto ambiental das edificações.

Foi essa convicção que orientou esta pesquisa. Ao caracterizar o perfil de carbono incorporado de 19 galpões logísticos no Estado de São Paulo — segmento que, apenas entre 2021 e 2025, expandiu seu estoque nacional de 17,3 para 28,0 milhões de m², com o Estado de São Paulo concentrando 68,7% desse mercado —, este trabalho evidenciou que a redução de carbono incorporado não depende de soluções exóticas ou de alto custo, mas de decisões de projeto bem informadas. A substituição parcial de cimento Portland por escória granulada de alto-forno (BFS/GGBS), por exemplo, respondeu por 93,5% das reduções médias de GWP/m² observadas entre os cenários Baseline e Design Final — uma razão de impacto concreto/aço de 4,39:1 —, resultando em reduções medianas de 19,5%, sem qualquer concessão de prazo, custo ou desempenho estrutural.

Mais do que isso, a correlação quase perfeita entre a massa de concreto por metro quadrado e o GWP/m² ($r = 0,969$) demonstra que o material mais empregado nesta tipologia é também o principal alavancador de sua descarbonização — e que decisões aparentemente técnicas, como o traço do concreto e a especificação do cimento, são, na prática, decisões ambientais. É precisamente nesse ponto que a sustentabilidade deixa de ser discurso e passa a ser decisão de projeto: quando uma metodologia confiável e cientificamente amparada — como o benchmark percentílico de seis classes (A+ a E) aqui proposto — permite ao projetista comparar, mensurar e justificar suas escolhas com a mesma objetividade com que se avalia um custo ou um prazo.

Ao propor uma régua nacional de referência para o carbono incorporado de galpões logísticos, esta pesquisa não pretende esgotar o tema, mas oferecer a engenheiros, incorporadores e projetistas do setor um instrumento replicável e tecnicamente ancorado para transformar a intenção sustentável em prática projetual. Se a construção civil deve, de fato, contribuir com a descarbonização exigida por um planeta de recursos finitos, é por meio de metodologias como esta — que substituem o discurso pela evidência — que essa transformação se torna possível.

REFERÊNCIAS

ALLIANCE HQE-GBC. **Baromètre 2022 de la base INIES**. Paris: Alliance HQE-GBC, 2022.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 233R-17**: Guide to the Use of Slag Cement in Concrete and Mortar. Farmington Hills: ACI, 2017.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 360R-10**: Guide to Design of Slabs-on-Ground. Farmington Hills: ACI, 2010.

ANTUNES, Mónica *et al.* Alternative clinker technologies for reducing carbon emissions in cement industry: a critical review. **Materials**, Basel, v. 15, n. 1, 209, 2022. DOI: 10.3390/ma15010209.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Tipos de cimento Portland**. São Paulo: ABCP, [2026]. Disponível em: <https://abcp.org.br/cimento/tipos/>. Acesso em: 30 maio 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. **Escória de alto-forno granulada moída para uso em cimento, concreto e argamassa**. Brasília, DF: ABDI, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES E GEOTECNIA. **Manual de especificações de produtos e procedimentos ABEF**. São Paulo: ABEF, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LOGÍSTICA. **Panorama do setor logístico brasileiro 2023**. São Paulo: ABRALOG, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6023**: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. Versão corrigida 2, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6122**: projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10520**: informação e documentação: citações em documentos: apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655**: concreto de cimento Portland: preparo, controle, recebimento e aceitação: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14724**: informação e documentação: trabalhos acadêmicos: apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697**: cimento Portland: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14025**: rótulos e declarações ambientais: declarações ambientais de Tipo III: princípios e procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040**: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14044**: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

BAUMANN, H.; TILLMAN, A.-M. **The Hitch Hiker's Guide to LCA**: An Orientation in Life Cycle Assessment Methodology and Application. Lund: Studentlitteratur, 2004.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Rodoanel, a maior obra viária do Brasil**. Brasília, DF: DNIT, 2015.

BUENO, Cristiane. **Avaliação do ciclo de vida na construção civil**: análise de sensibilidade. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

BUILDING TRANSPARENCY. **EC3**: Embodied Carbon in Construction Calculator: open database for embodied carbon benchmarking. Seattle: Building Transparency, 2019. Disponível em: <https://www.buildingtransparency.org>. Acesso em: 10 mar. 2025.

CALDAS, Lucas Rosse *et al.* Contribuição para a avaliação de ciclo de vida na quantificação de impactos ambientais de sistemas construtivos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 365-385, abr./jun. 2018. DOI: 10.1590/s1678-86212018000200259.

CARBON LEADERSHIP FORUM. **EC3 Tool Data Methodology**: Beta Draft. Seattle: Carbon Leadership Forum, 2019. Disponível em: https://www.pankowfoundation.org/site/assets/files/2029/7_-_clf-ec3-tool-methodology-beta-2019_11_19.pdf. Acesso em: 1 maio 2026.

CBRE. **Emerging Industrial Markets**: Sao Paulo. São Paulo: CBRE, 2024.

CERWAY. HQE certification. Paris: Cerway, 2024. Disponível em: <https://www.behqe.com/>. Acesso em: 05 jan. 2026.

CEMENTITIOUS SLAG MAKERS ASSOCIATION. **GGBS concrete**. [S. l.]: CSMA, [2026]. Disponível em: <https://ukcsma.co.uk/ggbs-concrete/>. Acesso em: 6 maio 2026.

COLLIERS. **Market Overview 1T24**: condomínios logísticos Brasil. São Paulo: Colliers, 2024.

COLLIERS. **Market Overview 4T24**: condomínios logísticos Brasil. São Paulo: Colliers, 2025. Disponível em: https://www.colliers.com/pt-br/pesquisa/market_overview_4t2024_log. Acesso em: 5 maio 2026.

COLLINGS, David. Carbon footprint benchmarking data for buildings. **The Structural Engineer**, London, v. 98, n. 10, p. 10-13, nov./dez. 2020.

COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL. **Cimentos**. São Paulo: CSN, [2026]. Disponível em: <https://www.csn.com.br/homepage/cimentos/>. Acesso em: 6 maio 2026.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. **Agenda Carbono Zero**: estratégias para a construção civil brasileira. São Paulo: CBCS, 2014.

CORDER, G. W.; FOREMAN, D. I. **Nonparametric Statistics for Non-Statisticians: A Step-by-Step Approach**. Hoboken: Wiley, 2009.

CRESWELL, J. W. **Projeto de pesquisa**: métodos qualitativo, quantitativo e misto. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2010.

CTE — CENTRO DE TECNOLOGIA DE EDIFICAÇÕES. **Relatórios de Análise do Ciclo de Vida de Edificações Logísticas em São Paulo** (E01-G1 a E09-G3). São Paulo, 2024. 19 relatórios técnicos internos não publicados. Disponibilizados mediante autorização para fins acadêmicos.

CUSHMAN & WAKEFIELD. **Mercado de galpões logísticos no Brasil**: desempenho em 2024 e expectativas para 2025. São Paulo: Cushman & Wakefield, 2025.

DE SCHEPPER, M. *et al.* Completely Recyclable Concrete: Recuperation of All Components. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 62, p. 130-138, 2014.

DIXIT, M. K. *et al.* Identification of Parameters for Embodied Energy Measurement: A Literature Review. **Energy and Buildings**, Amsterdam, v. 42, n. 8, p. 1238-1247, 2010.

DODD, Nicholas *et al.* **Level(s)**: a common EU framework of core sustainability indicators for office and residential buildings: parts 1 and 2: introduction to Level(s) and how it works (Beta v1.0). Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017. DOI: 10.2760/827838.

ETOOL PTY LTD. **eTool LCA**: whole of life environmental assessment software. Perth: eTool PTY LTD, 2024. Disponível em: <https://etoolglobal.com>. Acesso em: 15 jan. 2025.

EUROPEAN COMMISSION. **Level(s)**: a common EU framework of core sustainability indicators for office and residential buildings. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020.

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

EVANGELISTA, Patrícia P. A. *et al.* Environmental performance analysis of residential buildings in Brazil using life cycle assessment (LCA). **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 169, p. 748-761, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.045.

FERNANDES, Isabela M.; SHIMBO, Lúcia Z. Certificação ambiental de edifícios no Brasil: LEED e suas relações com os portfólios de fundos de investimento imobiliário. *In*: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA USP, 32., 2024, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: USP, 2024.

FIELD, A. **Descobrimos a estatística usando o SPSS**. 5. ed. Porto Alegre: Penso, 2018.

FUNDAÇÃO CARLOS ALBERTO VANZOLINI. **AQUA-HQE™**. São Paulo: Fundação Carlos Alberto Vanzolini, [2026]. Disponível em: <https://vanzolini.org.br/organizacoes/certificacoes/aqua-hqe/>. Acesso em: 5 maio 2026.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

GREEN BUILDING COUNCIL BRASIL. **Case FW5**: primeiro LEED Platinum O+M Warehouses and Distribution Centers do Brasil. São Paulo: GBC Brasil, 2024.

GREEN BUSINESS CERTIFICATION INC. **EDGE**: Green building certification. Washington, DC: GBCI, [2026]. Disponível em: <https://edge.gbci.org/>. Acesso em: 5 maio 2026.

GREEN BUSINESS CERTIFICATION INC. **Whole building life cycle assessment through LEED v4**. Washington, DC: GBCI, 2017. Disponível em: <https://www.gbci.org/whole-building-life-cycle-assessment-through-leed-v4>. Acesso em: 5 maio 2026.

GUINÉE, J. B. *et al.* (ed.). **Handbook on Life Cycle Assessment**: Operational Guide to the ISO Standards. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002. (Eco-efficiency in Industry and Science, v. 7).

HABERT, G.; D'ESPIROSE DE LACAILLERIE, J. B.; ROUSSEL, N. An Environmental Evaluation of Geopolymer Based Concrete Production: Reviewing Current Research Trends. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 19, n. 11, p. 1229-1238, 2011.

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*, v. 1, p. 559–573, 2020. DOI: 10.1038/s43017-020-0093-3

KENDALL, Maurice G. A new measure of rank correlation. *Biometrika*, Oxford, v. 30, n. 1/2, p. 81-93, 1938. DOI: 10.1093/biomet/30.1-2.81. Disponível em: <https://academic.oup.com/biomet/article-abstract/30/1-2/81/176907>. Acesso em: 05 jun. 2026.

KENDALL, Maurice G.; GIBBONS, Jean Dickinson. *Rank correlation methods*. 5. ed. New York: Oxford University Press, 1990

IFC - INTERNATIONAL FINANCE CORPORATION. *EDGE User Guide: Part 1: EDGE Building Certification Guidance*. Washington, DC: International Finance Corporation, 2024. Disponível em: <https://edgebuildings.com/wp-content/uploads/2024/12/Part-1-EDGE-Building-Certification-Guidance-Rev-1.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2026.

ILOS. Panorama do mercado de condomínios logísticos no Brasil. Rio de Janeiro: Instituto de Logística e Supply Chain, 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA. SICV Brasil: Sistema de Informação de Ciclo de Vida do Brasil. Brasília, DF: IBICT, 2014. Disponível em: <http://sicv.acv.ibict.br>. Acesso em: 20 fev. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. Portaria nº 42, de 24 de fevereiro de 2021. Aprova a Instrução Normativa INMETRO para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C). Rio de Janeiro: INMETRO, 2021.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change... Cambridge: Cambridge University Press, 2022

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY; CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE. Technology roadmap: low-carbon transition in the cement industry. Paris: IEA; Geneva: WBCSD, 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Global Status Report for Buildings and Construction 2022. Paris: IEA, 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14040:2006: Environmental management: Life cycle assessment: Principles and framework. Geneva: ISO, 2006a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14044:2006**: Environmental management: Life cycle assessment: Requirements and guidelines. Geneva: ISO, 2006b.

JLL. **Mercado industrial e logístico no Brasil**: 1T 2025. São Paulo: JLL, 2025. Disponível em: <https://www.jll.com/en-us/insights/market-dynamics/relatorio-industrial-logistico>. Acesso em: 5 maio 2026.

JLL BRASIL. **Mercado imobiliário logístico e industrial**: Brasil 4T24. São Paulo: JLL, 2024.

JOHN, Vanderley M.; AGOPYAN, Vahan. **Reciclagem de escória de alto-forno no Brasil**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, [199-?].

JONES, C. *The Inventory of Carbon & Energy (ICE) Database v3.0*. Circular Ecology, 2019.

LASVAUX, S. *et al.* Comparison of Embodied Carbon Databases for Buildings: Analysis of the Sources of Divergence. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, Berlin, v. 20, n. 4, p. 538-556, 2015.

LEED KSA. *LEED Certification Requirements – Green Building*. 2024. Disponível em: <https://leedksa.com/leed-certification-requirements/>. Acesso em: 2 jun. 2026.

LI, Yao *et al.* Environmental impact analysis of blast furnace slag applied to ordinary Portland cement production. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 120, p. 221-230, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.12.071.

LOTENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary Cementitious Materials. **Cement and Concrete Research**, Amsterdam, v. 41, n. 12, p. 1244-1256, 2011.

LÜTZKENDORF, T.; FRISCHKNECHT, R. Embodied carbon emissions in buildings: explanations, interpretations, recommendations. **Buildings and Cities**, [S. l.], v. 3, n. 1, p. 964-973, 2022. DOI: 10.5334/bc.257.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 4. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

ONE CLICK LCA. **Embodied carbon benchmarks for European buildings**: according to EN 15978:2011 & Level(s) framework. Helsinki: One Click LCA, 2021.

ONE CLICK LCA. **LEED v4.1 BD+C MRC1 Building Life-Cycle Impact Reduction**. Helsinki: One Click LCA, 2025. Disponível em: <https://help.oneclicklca.com/en/articles/275687-leed-v4-1-bd-c-mrc1-building-life-cycle-reduction-international-north-america>. Acesso em: 5 maio 2026.

PBE EDIFICA. **Instrução Normativa INMETRO para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas**. [S. l.]: PBE Edifica, [2026]. Disponível em: <https://pbeedifica.com.br/inic>. Acesso em: 30 maio 2026.

POMPONI, F.; MONCASTER, A. Embodied Carbon Mitigation and Reduction in the Built Environment: What Does the Evidence Say? **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 181, p. 687-700, 2016.

RÖCK, M. *et al.* Embodied GHG Emissions of Buildings: The Hidden Challenge for Effective Climate Change Mitigation. **Applied Energy**, Amsterdam, v. 258, p. 114107, 2020.

ROYAL INSTITUTION OF CHARTERED SURVEYORS. **Whole life carbon assessment for the built environment**. 2. ed. London: RICS, 2023.

SAADE, Marcella Ruschi Mendes; SILVA, Maristela Gomes da; SILVA, Vanessa Gomes da. Methodological discussion and piloting of LCA-based environmental indicators for product stage assessment of Brazilian buildings. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, São Carlos, v. 9, n. 1, 2014. DOI: 10.11606/gtp.v9i1.89987.

SÄYNÄJOKI, A. *et al.* Do Large Greenhouse Gas Reductions in Construction Decrease Emissions in Operation? **Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems**, Zagreb, v. 5, n. 4, p. 506-519, 2017.

SEGRO PLC. **Responsible SEGRO Report 2024**. London: SEGRO, 2024.
SIIA. **Bandeirantes/Anhanguera lidera estoque de imóveis logísticos entre eixos no Estado de São Paulo**. São Paulo: SiiLA, [2024?].

SILVA, Fernanda Belizario *et al.* **Life Cycle Inventories of Cement, Concrete and Related Industries**: Brazil. [S. l.]: ecoinvent, 2019.

SILVA, Fernanda Belizario *et al.* Primary data priorities for the life cycle inventory of construction products: focus on foreground processes. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, Berlin, v. 25, p. 980-997, 2020. DOI: 10.1007/s11367-020-01762-4.

SILVA, Fernanda Belizario *et al.* The Sidac system: streamlining the assessment of the embodied energy and CO₂ of Brazilian construction products. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 417, 138461, 2023. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138461.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Anuário SNIC 2023**: performance da indústria cimenteira brasileira. Rio de Janeiro: SNIC, 2023.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Roadmap tecnológico do cimento**: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro: SNIC; ABCP, 2019. Disponível em: <http://snic.org.br>. Acesso em: 06 maio 2026.

STAFFORD, Fernanda do Nascimento *et al.* Life cycle assessment of the production of cement: a Brazilian case study. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 137, p. 1293-1299, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.07.050.

STEEL CONSTRUCTION INSTITUTE. **Sustainable Steel in Multi-Storey Buildings**. 3. ed. Ascot: SCI, 2020. (Publication P350).

TAVARES, Sérgio Fernando. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

TAYLOR, M. *et al.* Use of Life Cycle Assessment (LCA) Indicators for the Assessment of the Sustainability of Industrial Buildings. **Journal of Industrial Ecology**, New Haven, v. 10, n. 4, p. 67-84, 2006.

THE CONCRETE CENTRE. **Whole-life carbon and buildings**: concrete solutions for reducing embodied and operational CO₂. London: The Concrete Centre, 2021.

THE CONCRETE SOCIETY. **TR34**: concrete industrial ground floors: a guide to design and construction. 4. ed. Camberley: The Concrete Society, 2013.

THE INSTITUTION OF STRUCTURAL ENGINEERS. **How to calculate embodied carbon**. 2. ed. London: IStructE, 2022.

TRITAX BIG BOX REIT PLC. **2024 ESG Report**. London: Tritax Big Box REIT, 2024.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **2022 Global Status Report for Buildings and Construction**: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2022.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Paris Agreement**. Paris: UNFCCC, 2015. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>. Acesso em: 5 jan. 2026.

U.S. GREEN BUILDING COUNCIL. **LEED v4.1**. Washington, DC: USGBC, [2026]. Disponível em: <https://www.usgbc.org/leed/v41>. Acesso em: 5 maio 2026.

USGBC - U.S. GREEN BUILDING COUNCIL. *LEED rating system*. Washington, DC: U.S. Green Building Council, 2024. Disponível em: <https://www.usgbc.org/leed>. Acesso em: 5 jun. 2026

WOOLDRIDGE, J. M. **Introdução à econometria**: uma abordagem moderna. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2019.

WORLD GREEN BUILDING COUNCIL. **Bringing Embodied Carbon Upfront**: Coordinated Action for the Buildings and Construction Sector to Tackle Embodied Carbon. London: WorldGBC, 2019.

WORRELL, E. *et al.* Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement Industry. **Annual Review of Energy and the Environment**, Palo Alto, v. 26, n. 1, p. 303-329, 2001.

YIN, R. K. **Estudo de caso**: planejamento e métodos. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

APÊNDICE A — DADOS INDIVIDUAIS DOS 19 GALPÕES LOGÍSTICOS

A Tabela A.1 apresenta os dados individuais de cada galpão, incluindo localização, área construída, GWP nos dois cenários avaliados, percentual de redução alcançado e a classe atribuída pelo sistema de benchmark de carbono incorporado proposto neste trabalho.

Tabela A.1 – Dados individuais dos galpões logísticos analisados e classificação no benchmark

Cód.	Município	Área (m²)	GWP Baseline (kgCO₂e/m²)	GWP Design Final (kgCO₂e/m²)	Redução (%)	Classe Baseline	Classe D.F.
E01-G1	Mauá	62.818	491,5	395,8	19,5%	D	D
E01-G2	Mauá	15.627	611,5	482,2	21,2%	E	D
E02-G1	Itapecerica da Serra	11.798	323,9	261,4	19,3%	B	A
E02-G2	Itapecerica da Serra	53.755	237,6	209,0	12,0%	A+	A+
E02-G3	Itapecerica da Serra	19.274	321,9	315,0	2,2%	B	B
E03-G1	Cabreúva	173.436	273,8	216,7	20,9%	A	A+
E04-G1	Guarulhos	105.351	208,5	199,2	4,4%	A+	A+
E04-G2	Guarulhos	23.167	278,7	269,4	3,3%	B	A
E04-G3	Guarulhos	46.383	264,4	255,5	3,4%	A	A
E04-G4	Guarulhos	51.448	360,6	266,8	26,0%	C	A
E05-G1	Barueri	106.505	279,1	276,4	1,0%	B	B
E06-G1	Guarulhos	131.426	347,1	288,4	16,9%	C	B
E06-G2	Guarulhos	105.869	288,9	232,2	19,6%	B	A+
E07-G1	São Paulo	9.060	361,8	257,7	28,8%	C	A

Cód.	Município	Área (m²)	GWP Baseline (kgCO₂e/m²)	GWP Design Final (kgCO₂e/m²)	Redução (%)	Classe Baseline	Classe D.F.
E07-G2	São Paulo	11.318	371,1	265,6	28,4%	D	A
E08-G1	Cajamar	14.416	504,7	463,9	8,1%	D	D
E09-G1	Guarulhos	24.442	251,1	174,6	30,5%	A	A+
E09-G2	Guarulhos	13.544	333,3	222,3	33,3%	C	A+
E09-G3	Guarulhos	4.376	877,3	584,3	33,4%	E	E

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos estudos de ACV (eTool, 2024).

APÊNDICE B — COMPOSIÇÃO DE MATERIAIS E ANÁLISE DE CARBONO (BASELINE)

A Tabela B.1 apresenta, por galpão, a participação relativa do concreto e do aço no GWP total do ciclo de vida (todos os módulos avaliados), bem como a massa de concreto por m² calculada a partir dos dados brutos do software eTool. A coluna Massa Concreto A1-A3 refere-se exclusivamente ao módulo de produção dos materiais; a coluna Massa Concreto Total inclui os módulos A1-A3, A4, C2 e C4.

Tabela B.1 – Participação dos materiais no GWP total e massa de concreto por m²

Cód.	Município	% Concreto no GWP Total	% Aço no GWP Total	Massa Concreto A1–A3 (kg/m ²)	Massa Concreto Total (kg/m ²)	GWP Baseline (kgCO ₂ e/m ²)
E01-G1	Mauá	73,6%	22,4%	1179,6	5897,8	491,5
E01-G2	Mauá	74,0%	22,6%	1476,7	7383,4	611,5
E02-G1	Itapecerica da Serra	47,4%	42,9%	538,4	2034,2	323,9
E02-G2	Itapecerica da Serra	50,8%	35,8%	433,5	1459,9	237,6
E02-G3	Itapecerica da Serra	44,1%	46,3%	499,6	1834,4	321,9
E03-G1	Cabreúva	68,8%	26,8%	617,2	3043,5	273,8
E04-G1	Guarulhos	79,1%	17,0%	528,1	2639,7	208,5
E04-G2	Guarulhos	63,4%	32,1%	568,3	2841,4	278,7
E04-G3	Guarulhos	63,1%	32,1%	529,9	2649,4	264,4
E04-G4	Guarulhos	49,9%	46,6%	580,6	2903,2	360,6
E05-G1	Barueri	58,2%	31,5%	512,8	2563,9	279,1
E06-G1	Guarulhos	62,0%	28,1%	692,3	3461,7	347,1
E06-G2	Guarulhos	57,7%	29,8%	539,2	2696,0	288,9
E07-G1	São Paulo	62,7%	25,9%	717,6	3588,1	361,8

Cód.	Município	% Concreto no GWP Total	% Aço no GWP Total	Massa Concreto A1–A3 (kg/m²)	Massa Concreto Total (kg/m²)	GWP Baseline (kgCO₂e/m²)
E07-G2	São Paulo	58,4%	29,0%	682,8	3413,9	371,1
E08-G1	Cajamar	74,1%	18,9%	1155,1	5775,5	504,7
E09-G1	Guarulhos	61,3%	28,2%	490,8	2453,8	251,1
E09-G2	Guarulhos	68,2%	23,5%	724,3	3621,4	333,3
E09-G3	Guarulhos	81,9%	16,0%	2291,8	11459,2	877,3

Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com base nos dados brutos do eTool (abas Baseline). Nota: % calculados sobre o GWP total de todos os módulos avaliados (A1–A3, A4, C2 e C4).

APÊNDICE C — ESTRATÉGIAS DE DESCARBONIZAÇÃO POR GALPÃO (DESIGN FINAL)

A Tabela C.1 registra, por galpão, o número de estratégias de descarbonização modeladas no cenário Design Final e a descrição de cada intervenção, conforme declarado nos relatórios de Avaliação do Ciclo de Vida (eTool, 2024). O número de estratégias corresponde à contagem de cenário declarada em cada relatório analisado. (“X strategies were modelled in the Final Design”).

Tabela C.1 – Estratégias de descarbonização adotadas no Design Final por galpão

Cód.	Município	N.º Estratégias	Estratégias Adotadas no Design Final
E01-G1	Mauá	3	1. Cimento com escória de alto-forno (BFS) — estacas de fundação e laje de piso; 2. Otimização do concreto de piso (–540 m³); 3. Aço com conteúdo reciclado.
E01-G2	Mauá	3	1. Cimento com escória (BFS) — estacas de fundação e laje piso; 2. Otimização do concreto de piso (–397 m³); 3. Aço com conteúdo reciclado.
E02-G1	Itapecerica da Serra	3	1. Substituição de pilares metálicos por estrutura de concreto (–126.700 kg de aço); 2. Redução de ~64% da área de cobertura em telha metálica zipada; 3. Ajustes de armação e estrutura de concreto.
E02-G2	Itapecerica da Serra	5	1. Aço reciclado — subestrutura; 2. Aço reciclado — superestrutura; 3. Cimento com 13% BFS — pisos; 4. Cimento com 13% BFS — subestrutura; 5. Método de disposição do concreto (fim de vida).
E02-G3	Itapecerica da Serra	5	1. Aço reciclado — subestrutura; 2. Aço reciclado — superestrutura; 3. Cimento com 13% BFS — pisos e rampas;

Cód.	Município	N.º Estratégias	Estratégias Adotadas no Design Final
			4. Concreto com BFS — subestrutura; 5. Método de disposição do concreto (fim de vida).
E03-G1	Cabreúva	3	1. Aço com conteúdo reciclado; 2. Cimento com escória (BFS) — subestrutura; 3. Cimento com escória (BFS) — superestrutura (estacas, blocos, pilares/vigas, piso e tilt-up).
E04-G1	Guarulhos	1	1. Cimento com escória (BFS) — concreto de piso e rampas (+ aço reciclado, efeito menor).
E04-G2	Guarulhos	1	1. Cimento com escória (BFS) — concreto de piso e rampa (+ aço reciclado).
E04-G3	Guarulhos	1	1. Cimento com escória (BFS) — concreto de piso e rampa (+ aço reciclado).
E04-G4	Guarulhos	1	1. Cimento com escória (BFS $\geq 34\%$) — concreto de piso/fundações (+ aço reciclado).
E05-G1	Barueri	1	1. Agregados reciclados (brita graduada de menor emissão). [Relatório de cenário não revisado — não atende à ISO 14044:2006.]
E06-G1	Guarulhos	6	1. Otimização de pilares; 2. Otimização de painéis pré-moldados; 3. EPD de lâ de vidro (Fibreglass); 4. Agregados reciclados; 5. Concreto com 48% BFS — fundações; 6. Concreto com 48% BFS — laje de piso.
E06-G2	Guarulhos	7	1. Otimização de fundações; 2. Otimização de pilares; 3. Otimização de painéis pré-moldados; 4. EPD de lâ de vidro (Fibreglass); 5. Agregados reciclados; 6. Concreto com 48% BFS — fundações; 7. Concreto com 48% BFS — laje de piso.
E07-G1	São Paulo	6	1. Otimização da estrutura da laje de piso; 2. Concreto das estacas (CPII E40 Votorantim); 3. Concreto da laje de piso (CPII E40 Votorantim);

Cód.	Município	N.º Estratégias	Estratégias Adotadas no Design Final
			4. Capeamento da laje do mezanino; 5. Concreto pré-moldado da estrutura; 6. Cobertura — chapa de aço (ArcelorMittal).
E07-G2	São Paulo	6	1. Otimização da estrutura da laje de piso; 2. Concreto das estacas (CPII E40 Votorantim); 3. Concreto da laje de piso (CPII E40 Votorantim); 4. Capeamento da laje do mezanino; 5. Concreto pré-moldado da estrutura; 6. Cobertura — chapa de aço (ArcelorMittal).
E08-G1	Cajamar	2	1. Cimento Votorantim CPII F32 (menor intensidade de carbono); 2. Tela/armação ArcelorMittal (menor GWP unitário).
E09-G1	Guarulhos	9	1. EPD lã de vidro Facefelt Saint-Gobain; 2. EPD barras de aço ArcelorMittal; 3. EPD Cimento CPII E40 Votorantim (fundações); 4. Concreto com 34% BFS (laje de piso); 5. Agregados reciclados; 6. EPD bobina laminada a quente ArcelorMittal; 7. EPD Cimento CP V ARI Votorantim; 8. EPD barras de aço ArcelorMittal (pré-moldados); 9. Demais ajustes de cenário. [Relatório de cenário não revisado — não atende à ISO 14044:2006.]
E09-G2	Guarulhos	9	1. EPD lã de vidro Facefelt Saint-Gobain; 2. EPD barras de aço ArcelorMittal; 3. EPD Cimento CPII E40 Votorantim (fundações); 4. Concreto com 34% BFS (laje de piso); 5. Agregados reciclados; 6. EPD bobina laminada a quente ArcelorMittal; 7. EPD Cimento CP V ARI Votorantim; 8. EPD barras de aço ArcelorMittal (pré-moldados);

Cód.	Município	N.º Estratégias	Estratégias Adotadas no Design Final
			9. Demais ajustes de cenário. [Relatório de cenário não revisado — não atende à ISO 14044:2006.]
E09-G3	Guarulhos	8	1. EPD lã de vidro Facefelt Saint-Gobain; 2. EPD barras de aço ArcelorMittal; 3. EPD Cimento CPlI E40 Votorantim (30% das fundações); 4. Concreto com BFS; 5. EPD bobina laminada a quente ArcelorMittal; 6. EPD Cimento CP V ARI Votorantim; 7. EPD barras de aço ArcelorMittal (pré-moldados); 8. Demais ajustes de cenário. [Relatório de cenário não revisado — não atende à ISO 14044:2006.]

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Resumo_Estratégias_GWP (2026).

APÊNDICE D — ROTINA COMPUTACIONAL DE ANÁLISE ESTATÍSTICA

O código a seguir foi desenvolvido em Python para realizar a análise estatística dos dados apresentados na Tabela 2 e no Apêndice B, incluindo estatística descritiva, correlações, regressão log-log e classificação percentilica dos galpões avaliados.

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
APÊNDICE D - ROTINA COMPUTACIONAL DE ANÁLISE ESTATÍSTICA

TCC: ACV em Edificações – Benchmark de Galpões Logísticos (SP)

Requisitos: pip install numpy pandas scipy statsmodels

Dados: 19 galpões embutidos (idênticos à Tabela 2 e ao Apêndice B).
N_Estrategias = contagem dos relatórios eTool (corrigida).
"""

import numpy as np, pandas as pd
from scipy import stats
import statsmodels.api as sm

# 1) BASE DE DADOS (n=19): cod, area, pé-direito, GWP_B, GWP_F, massa concreto/m²,
# N estratégias

dados = [
    ("E04-G1",105351,12.0,208.5,199.2, 2639.7,1), ("E02-G2",
53755,12.0,237.6,209.0, 1459.9,5),
    ("E09-G1", 24442,10.0,251.1,174.6, 2453.8,9), ("E04-G3",
46383,12.0,264.4,255.5, 2649.4,1),
    ("E03-G1",173436,17.3,273.8,216.7, 3043.5,3), ("E04-G2",
23167,12.0,278.7,269.4, 2841.4,1),
    ("E05-G1",106505,14.6,279.1,276.4, 2563.9,1), ("E06-
G2",105869,12.0,288.9,232.2, 2696.0,7),
    ("E02-G3", 19274,12.0,321.9,315.0, 1834.4,5), ("E02-G1",
11798,12.0,323.9,261.4, 2034.2,3),
    ("E09-G2", 13544,10.0,333.3,222.3, 3621.4,9), ("E06-
G1",131426,12.0,347.1,288.4, 3461.7,6),
    ("E04-G4", 51448,12.0,360.6,266.8, 2903.2,1), ("E07-G1",
9060,10.0,361.8,257.7, 3588.1,6),
    ("E07-G2", 11318,10.0,371.1,265.6, 3413.9,6), ("E01-G1",
62818,12.0,491.5,395.8, 5897.8,3),
    ("E08-G1", 14416,12.0,504.7,463.9, 5775.5,2), ("E01-G2",
15627,12.0,611.5,482.2, 7383.4,3),
```

```

        ("E09-G3", 4376,10.0,877.3,584.3,11459.2,8),
    ]

df = pd.DataFrame(dados,
columns=["cod","area_m2","pe_direito","gwp_b","gwp_f","massa_conc_m2","n_estrategi
as"])

df["red_pct"] = (df["gwp_b"] - df["gwp_f"]) / df["gwp_b"] * 100.0

# 2) ESTATÍSTICA DESCRITIVA (Tabela 3) – média, mediana, DP, CV, percentis, forma
def descritiva(x):
    x = np.asarray(x, float); q1, med, q3 = np.percentile(x, [25, 50, 75])
    return dict(media=x.mean(), mediana=med, dp=x.std(ddof=1),
cv=x.std(ddof=1)/x.mean()*100,
                minimo=x.min(), maximo=x.max(), p10=np.percentile(x,10), p25=q1,
p75=q3,
                p90=np.percentile(x,90), iqr=q3-q1, skew=stats.skew(x,bias=False),
                kurt=stats.kurtosis(x,bias=False))

for nome, col in [("Baseline","gwp_b"), ("Design Final","gwp_f"), ("Redução
%", "red_pct")]:
    d = descritiva(df[col])
    print(f"[{nome}] média={d['media']:.1f} mediana={d['mediana']:.1f}
DP={d['dp']:.1f} "
        f"CV={d['cv']:.1f}% P10={d['p10']:.1f} P90={d['p90']:.1f}
skew={d['skew']:.2f} kurt={d['kurt']:.2f}")

# 3) CORRELAÇÕES Pearson / Spearman / Kendall (Tabelas 7-8)
def corr(a,b):
    return (stats.pearsonr(a,b), stats.spearmanr(a,b), stats.kendalltau(a,b))

for nome, ca, cb in [("Massa concreto/m² × GWP_B (H1)","massa_conc_m2","gwp_b"),
                    ("Área × GWP_B","area_m2","gwp_b"),
                    ("N_Estrategias × Redução","n_estrategias","red_pct")]:
    (r,pr),(rho,pp),(tau,pt) = corr(df[ca], df[cb])
    print(f"[{nome}] r={r:+.3f}(p={pr:.4f}) rho={rho:+.3f}(p={pp:.4f})
tau={tau:+.3f}(p={pt:.4f})")

# 4) REGRESSÃO LOG-LOG  $\ln(\text{GWP}_B) \sim \ln(\text{Área})$  (efeito de escala, H3 – Tabela 9)
X = sm.add_constant(np.log(df["area_m2"])); m = sm.OLS(np.log(df["gwp_b"]),
X).fit()

beta = m.params.iloc[1]

print(f"[Reg log-log] beta={beta:.3f} (p={m.pvalues.iloc[1]:.4f})
R2={m.rsquared:.3f} ")

```

```

f"-> dobrar area = {(2**beta-1)*100:.1f}% no GWP/m²")

# 5) BENCHMARK PERCENTÍLICO A+..E (Quadro 6 / Tabela 10)
p10,p25,p50,p75,p90 = np.percentile(df["gwp_b"], [10,25,50,75,90])
def classe(v):
    return "A+" if v<=p10 else "A" if v<=p25 else "B" if v<=p50 else "C" if v<=p75
    else "D" if v<=p90 else "E"
df["classe_b"] = df["gwp_b"].apply(classe); df["classe_f"] =
df["gwp_f"].apply(classe)
ordem = ["A+","A","B","C","D","E"]
print("Limiares:", [round(x) for x in (p10,p25,p50,p75,p90)])
print("Distribuição:",
df["classe_b"].value_counts().reindex(ordem).fillna(0).astype(int).to_dict())
sobe = (df["classe_b"].map(ordem.index) > df["classe_f"].map(ordem.index)).sum()
print(f"Sobem >=1 classe: {sobe}/19")

```