



**INSTITUTO
FEDERAL**

Ceará

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ

IFCE - CAMPUS FORTALEZA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL

MESTRADO ACADÊMICO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL

THAÍS SILVA DE ARAÚJO

**ESTUDO DE EMISSÕES DE CARBONO E NEUTRALIZAÇÃO APLICADO À
EXECUÇÃO DE FUNDAÇÕES PROFUNDAS NA CIDADE DE FORTALEZA.**

FORTALEZA

2026

THAÍS SILVA DE ARAÚJO

ESTUDO DE EMISSÕES DE CARBONO E NEUTRALIZAÇÃO APLICADO À EXECUÇÃO
DE FUNDAÇÕES PROFUNDAS NA CIDADE DE FORTALEZA.

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Tecnologia e Gestão Ambiental do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do IFCE - Campus Fortaleza da Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental. Área de Concentração: Gestão e Saneamento Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Marcos Fábio Porto de Aguiar

FORTALEZA

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- A658e Araújo, Thaís Silva de.
 Estudo de Emissões de Carbono e Neutralização Aplicado à Execução de Fundações Profundas na Cidade de Fortaleza / Thaís Silva de Araújo. - 2026.
 93 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental, Campus Fortaleza, 2026.
 Orientação: Prof. Dr. Marcos Fábio Porto de Aguiar .
1. Pegada de carbono. 2. Fundações profundas. 3. Estaca raiz. 4. Estaca hélice contínua. 5. Neutralização de carbono. I. Título.

CDD 628



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
Av. 13 de maio, 2081 - Bairro Benfica - CEP 60040-531 - Fortaleza - CE - www.ifce.edu.br

FOLHA DE APROVAÇÃO

Processo: 23256.000371/2026-32

Interessado: Marcos Fabio Porto de Aguiar

THAÍS SILVA DE ARAÚJO

ESTUDO DE EMISSÕES DE CARBONO E NEUTRALIZAÇÃO APLICADO À EXECUÇÃO DE FUNDAÇÕES PROFUNDAS NA CIDADE DE FORTALEZA

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) *Campus* de Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental.

Aprovada em: **21/01/2026**.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcos Fábio Porto de Aguiar (orientador)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Fernando Feitosa Monteiro

Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)



Documento assinado eletronicamente por **Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos**, Usuário Externo, em 22/01/2026, às 14:39, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Fabio Porto de Aguiar**, Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico, em 22/01/2026, às 15:05, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fernando Feitosa Monteiro**, Usuário Externo, em 22/01/2026, às 16:07, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade do documento pode ser conferida no site https://sei.ifce.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 informando o código verificador **8336106** e o código CRC **BB0CAF23**.

À Deus. À minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida, pela força e pela sabedoria concedidas ao longo de toda esta caminhada, especialmente nos momentos de dificuldade, nos quais a fé foi essencial para a continuidade deste trabalho.

Aos meus pais, pelo amor incondicional, pelos ensinamentos e pelo apoio constante, que foram fundamentais para a minha formação pessoal e acadêmica. Ao meu irmão, pelo incentivo e pela presença ao longo desta trajetória.

Ao meu esposo, pelo companheirismo, paciência e apoio irrestrito durante todo o período do mestrado, compreendendo as ausências e os desafios enfrentados. Ao meu filho, minha maior motivação, que mesmo sem compreender plenamente este processo, foi fonte diária de inspiração, força e alegria.

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa de estudos, a qual foi fundamental para a realização deste trabalho, possibilitando dedicação às atividades de pesquisa e contribuindo significativamente para o desenvolvimento acadêmico e científico ao longo do curso de mestrado.

Aos professores do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), e ao meu orientador, pela orientação, disponibilidade e pelos conhecimentos compartilhados ao longo do curso, bem como aos colegas de mestrado, pela troca de experiências, apoio mútuo e companheirismo durante esta jornada acadêmica.

“Antes que eu te formasse no ventre, já te conhecia. E antes do teu nascimento já havia te consagrado”

(Jeremias 1:5)

RESUMO

A construção civil está entre os setores que mais contribuem para a emissão de gases de efeito estufa, especialmente em etapas que demandam elevado consumo de materiais e energia, como a execução de fundações profundas. Apesar da relevância ambiental desse processo, ainda são limitados os estudos que quantificam as emissões de dióxido de carbono associadas a essa etapa construtiva em contextos urbanos específicos, o que evidencia uma lacuna de conhecimento relacionada à mensuração e avaliação desses impactos. Nesse contexto, esta pesquisa tem como objetivo analisar as emissões de CO₂ provenientes da execução de fundações profundas, considerando seu potencial impacto ambiental e possibilidades de neutralização. Para isso, adotou-se uma abordagem metodológica baseada no levantamento de dados de consumo de materiais, insumos e utilização de equipamentos empregados durante a execução das fundações, seguida da estimativa das emissões por meio da aplicação de fatores de emissão disponíveis na literatura e em bases de dados ambientais. Os resultados demonstraram que a execução de estacas raiz apresentou emissões totais de 942,14 tCO₂e, enquanto a estaca hélice contínua resultou em 83,30 tCO₂e. Quando analisadas de forma normalizada em relação ao volume de estacas executadas, as emissões evidenciam diferenças significativas entre as tipologias, indicando maior intensidade de carbono associada às estacas raiz em comparação às estacas hélice contínua. A partir desses procedimentos, realizou-se a quantificação das emissões geradas e a análise de estratégias voltadas à mitigação e compensação do carbono emitido. A pesquisa demonstra que determinadas etapas construtivas apresentam maior contribuição para as emissões totais, especialmente aquelas relacionadas ao consumo de concreto, aço e ao uso de equipamentos de perfuração. Conclui-se que a mensuração das emissões associadas às fundações profundas constitui um instrumento relevante para a gestão ambiental na construção civil, permitindo identificar oportunidades de redução de impactos e subsidiar práticas construtivas mais sustentáveis.

Palavras-chave: Pegada de carbono. Fundações profundas. Estaca raiz. Estaca hélice contínua. Neutralização de carbono.

ABSTRACT

The construction industry is among the sectors that most contribute to greenhouse gas emissions, especially in stages that demand high consumption of materials and energy, such as the execution of deep foundations. Despite the environmental relevance of this process, studies that quantify carbon dioxide emissions associated with this construction stage in specific urban contexts remain limited, highlighting a knowledge gap related to the measurement and assessment of these impacts. In this context, this research aims to analyze CO₂ emissions resulting from the execution of deep foundations, considering their potential environmental impact and possibilities for neutralization. To achieve this, a methodological approach was adopted based on the collection of data regarding material consumption, inputs, and equipment used during foundation execution, followed by emission estimates through the application of emission factors available in the literature and environmental databases. The results showed that the execution of root piles generated total emissions of 942.14 tCO₂e, while continuous flight auger piles resulted in 83.30 tCO₂e. When normalized in relation to the volume of piles executed, the emissions reveal significant differences between typologies, indicating a higher carbon intensity associated with root piles compared to continuous flight auger piles. Based on these procedures, emissions were quantified and strategies for carbon mitigation and compensation were analyzed. The research demonstrates that certain construction stages contribute more significantly to total emissions, particularly those related to concrete and steel consumption and the use of drilling equipment. It is concluded that measuring emissions associated with deep foundations constitutes a relevant tool for environmental management in construction, enabling the identification of opportunities to reduce impacts and supporting more sustainable construction practices.

Keywords: Carbon footprint. Deep foundations. Root pile. Continuous flight auger pile. Carbon offset.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Histórico das Conferências e Acordos Ambientais Internacionais	21
Figura 2 — Avaliação do Ciclo de Vida na Construção Civil.	23
Figura 3 — Histórico Estaca Raíz.	24
Figura 4 — Execução Estaca Raíz.	25
Figura 5 — Etapas de Execução Estaca Raíz.	26
Figura 6 — Execução Estaca Hélice Contínua. Monitorada.	27
Figura 7 — Execução Estaca Hélice Contínua Monitorada.	28
Figura 8 — Histórico Estaca Hélice Contínua.	29
Figura 9 — Etapas PAS 2080.	33
Figura 10— Conceito de neutralidade de carbono.	38
Figura 11 — Fluxograma do desenvolvimento e funcionamento da calculadora de emissões.	57
Figura 12 — Protótipo da Calculadora de Carbono.	59
Figura 13 — Etapas Estacas Raíz.	61
Figura 14 — Etapas Estacas Hélice Contínua.	62
Figura 15 — Cálculo Emissões CO ₂ e Barras de Aço.	64
Figura 16 — Cálculo Emissões CO ₂ e Água.	65
Figura 17 — Cálculo Emissões CO ₂ e Óleo Diesel.	66
Figura 18 — Cálculo Emissões CO ₂ e Cimento.	67
Figura 19 — Cálculo Emissões CO ₂ e Total Obra Estaca Raíz.	68
Figura 20 — Quantidade de Emissão de Carbono por Material (CO ₂ e).	69
Figura 21 — Distribuição Percentual da Emissão de Carbono por Material.	70
Figura 22 — Cálculo Emissões CO ₂ e de Concreto.	71
Figura 23 — Cálculo Emissões CO ₂ e de Aço.	72
Figura 24 — Cálculo Emissões CO ₂ e de Óleo Diesel Puro.	73
Figura 25 — Cálculo Emissões CO ₂ e Total Obra Estaca Hélice Contínua.	74
Figura 26 — Quantidade de Emissão de Carbono por Material CO ₂ e.	75
Figura 27 — Distribuição Percentual da Emissão de Carbono por Material.	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Exemplo de cálculo da pegada de carbono em fundações	35
Tabela 2 — Fatores de emissão de materiais metálicos	51
Tabela 3 — Fatores de emissão de concretos CP II E 40	51
Tabela 4 — Fatores de emissão de concretos com reutilização	51
Tabela 5 — Fatores de emissão de concretos CP II-E-32 (CO)	52
Tabela 6 — Fatores de emissão de concretos CP II-E-32 (CD)	52
Tabela 7 — Fatores de emissão de concretos CP V-ARI	52
Tabela 8 — Fatores de emissão de concretos CP II-F-32	53
Tabela 9 — Fatores de emissão de argamassas e outros materiais	53
Tabela 10—Fatores de emissão de materiais metálicos internacionais	54
Tabela 11—Fatores de emissão de eletrodos de soldagem	54
Tabela 12—Fatores de emissão de concretos internacionais	54
Tabela 13—Fatores de emissão de concretos CP internacionais	54
Tabela 14—Fatores de emissão de argamassas internacionais	55
Tabela 15—Fatores de emissão de polímeros e água internacionais	55
Tabela 16—Fatores de emissão de materiais de transporte nacionais	55
Tabela 17—Fatores de emissão de materiais de transporte internacionais	56
Tabela 18—Emissões de CO ₂ e associadas aos insumos utilizados na execução das estacas raiz.	63
Tabela 19—Emissões de CO ₂ e associadas à execução de estacas hélice contínua.	70
Tabela 20—Cálculos de Volume e Emissões Normalizadas.	76
Tabela 21—Emissões de carbono e estimativa de compensação por meio de árvores	77
Tabela 22—Emissões de CO ₂ associadas aos materiais utilizados na execução de estacas raiz	78
Tabela 23—Emissões de CO ₂ associadas aos materiais utilizados na execução de estacas hélice contínua	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LCA	<i>Life Cycle Assessment</i> / Avaliação do Ciclo de Vida
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
COP	<i>Conference of the Parties</i> / Conferência das Partes
GEE	Gases de Efeito Estufa
GHG Protocol	<i>Greenhouse Gas Protocol</i> / Protocolo de Gases de Efeito Estufa
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PAS	<i>Publicly Available Specification</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	15
1.2	Objetivos	16
1.2.1	<i>Objetivo Geral</i>	16
1.2.2	<i>Objetivos Específicos</i>	16
1.3	Estrutura do Trabalho	17
2	REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1	Sustentabilidade na Construção Civil e Emissões de Carbono	18
2.2	Avaliação do Ciclo de Vida	18
2.3	Fundamentos Técnicos das Estacas Raiz e Hélice Contínua	22
2.3.1	<i>Estaca Raiz</i>	22
2.3.2	<i>Estaca Hélice Contínua</i>	26
2.4	Padrões de Pegada de Carbono	30
2.4.1	<i>Padrão Greenhouse Gas Protocol / Protocolo de Gases de Efeito Estufa (GHG Protocol)</i>	31
2.4.2	<i>International Organization for Standardization (ISO) 14064</i>	31
2.4.3	<i>Publicly Available Specification (PAS) 2080</i>	32
2.4.4	<i>ISO 14040 e ISO 14044</i>	33
2.5	Cálculo de Emissões	34
2.6	Emissores de Gases de Efeito Estufa (GEE) em Fundações e seus Fatores de Emissão	35
2.7	Pegada de Carbono de Fundações	36
2.8	Neutralização de Carbono	37
2.8.1	<i>Etapas da Neutralização de Carbono</i>	38
2.8.2	<i>Cálculo da Neutralização de Carbono</i>	39
2.9	Fundamentos Computacionais da Ferramenta de Cálculo de Carbono .	40
2.9.1	<i>Python e o Desenvolvimento de Soluções Técnicas</i>	40
2.9.2	<i>Interface Gráfica com Tkinter: Estrutura e Interação</i>	41
2.9.2.1	<i>Elementos de Interface: Entradas, Botões e Layouts</i>	41
2.9.2.2	<i>Papel da Interface Gráfica na Acessibilidade de Ferramentas Técnicas . . .</i>	42

2.9.3	<i>Estruturas de Dados e Lógica Computacional</i>	43
2.9.3.1	<i>Dicionários como Base para Armazenamento dos Fatores de Emissão</i>	43
2.9.3.2	<i>Integração com Pandas para Manipulação e Exportação</i>	44
2.9.3.3	<i>Fluxo Computacional: Entrada → Processamento → Saída</i>	44
2.9.4	<i>Visualização de Dados com Matplotlib</i>	45
2.9.4.1	<i>Geração de Gráficos Técnicos: Barras e Pizza</i>	45
2.9.4.2	<i>Interpretação Visual para Tomada de Decisão</i>	46
2.9.5	<i>Exportação dos Resultados: Organização e Compartilhamento</i>	46
2.9.5.1	<i>Geração de Planilhas no Formato Excel (.xlsx)</i>	46
2.9.5.2	<i>Compatibilidade com Softwares de Escritório e Planilhas Corporativas</i> . . .	47
2.9.6	<i>Distribuição da Ferramenta: Geração de Executável</i>	47
2.9.6.1	<i>Conceito de Empacotamento e Executáveis Portáteis</i>	47
2.9.6.2	<i>Ferramentas Utilizadas na Conversão: pyinstaller e suas limitações</i>	48
3	MATERIAL E MÉTODOS	49
3.1	Campo de Estudo da Pesquisa	49
3.2	Levantamento de Dados	50
3.3	Estruturação da Base de Dados	50
3.4	Desenvolvimento da Calculadora	56
3.4.1	<i>Estruturação da Interface Gráfica</i>	57
3.4.2	<i>Implementação do Cálculo de Emissões</i>	59
3.4.3	<i>Armazenamento e Exportação de Dados</i>	60
3.4.4	<i>Geração de Gráficos e Escalonamento Visual</i>	60
3.5	Análise dos Resultados	61
3.6	Etapas do Processo Construtivo Consideradas	61
3.7	Limitações	62
3.7.1	<i>Delimitação das fronteiras do sistema</i>	62
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.1	Estimativa de emissões para estacas raiz	77
4.2	Estimativa de emissões para estacas hélice contínua	78
4.3	Comparativo entre estacas	79
4.4	Comparativo entre a calculadora de Mazzutti (2023) e a ferramenta proposta	79

5	CONCLUSÃO	81
	REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é reconhecida como uma das indústrias mais poluentes e consumidoras de recursos naturais no mundo, sendo responsável por aproximadamente 40% das emissões globais de dióxido de carbono CO₂ e por um expressivo uso de energia (Ding *et al.*, 2022). Este cenário coloca o setor entre os principais agentes de impacto ambiental, o que tem motivado pesquisadores, profissionais e órgãos reguladores a buscarem soluções inovadoras e práticas sustentáveis que visem mitigar a pegada de carbono associada aos projetos de construção (Behera *et al.*, 2024). No Brasil, onde a infraestrutura de edificações demanda processos complexos e intensivos, a busca por alternativas para a redução de emissões torna-se um desafio para o desenvolvimento sustentável.

A etapa inicial do processo construtivo apresenta relevante interface com o meio ambiente envolvendo o uso de máquinas e equipamentos para o movimento de terra e execução de elementos de fundações e contenções. No caso das soluções de fundações, no contexto brasileiro, destacam-se as fundações profundas, como as estacas raiz e as estacas hélice contínua, especialmente em terrenos com características desafiadoras (Silva, 2020). Essas técnicas, essenciais para a segurança estrutural das edificações, apresentam impactos ambientais relevantes devido ao consumo de materiais como aço e concreto, além do uso de maquinário pesado. O processo de execução dessas estacas, que inclui etapas como perfuração, transporte e concretagem, contribui de forma significativa para a emissão de CO₂, elevando a necessidade de se estudar detalhadamente os processos construtivos envolvidos e suas consequências ambientais (Bao *et al.*, 2024).

Estudos tem enfatizado que a escolha do sistema de fundação exerce influência direta sobre as emissões de gases de efeito estufa associadas às edificações, como as pesquisas conduzidas por Sandanayake *et al.* (2016a; 2017) indicam que as fundações profundas respondem por parcela significativa das emissões totais de uma obra, principalmente em função do consumo de materiais de elevada intensidade de carbono. Esses trabalhos demonstram que análises comparativas entre diferentes tipologias de estacas permitem identificar alternativas com melhor desempenho ambiental, desde que consideradas as especificidades técnicas e construtivas inerentes a cada método executivo.

No cenário internacional e nacional, observa-se a consolidação da Avaliação do Ciclo de Vida como ferramenta metodológica aplicada à análise ambiental de fundações profundas. Estudos como os de Li e Zheng (2020) evidenciam que a aplicação da ACV em estacas moldadas

in loco e pré-moldadas possibilita a identificação das etapas mais representativas em termos de emissões, com destaque para a fabricação de materiais e o uso de equipamentos durante a execução. No Brasil, trabalhos como os de Costa (2012) e Mazzutti (2023) contribuíram para a quantificação de emissões associadas a materiais e processos construtivos.

Pesquisas demonstram que até 80% a 90% das emissões associadas às fundações estão relacionadas à fabricação de materiais, em especial cimento e aço, enquanto o uso de equipamentos responde por cerca de 12,7% e o transporte por 13,4% (Sandanayake *et al.*, 2016a; 2017). No Brasil, a ausência de um banco de dados nacional consolidado sobre fatores de emissão na construção civil agrava o desafio, levando pesquisadores a recorrer a bases internacionais, como Hammond e Jones (2011), para estimar impactos.

1.1 Justificativa

A ACV é uma metodologia amplamente utilizada para quantificar e avaliar os impactos ambientais de um produto, serviço ou processo ao longo de todas as fases de sua existência, sendo fundamental para compreender e estimar as emissões de carbono associadas às edificações (Lai; Lu, 2024). Desde a extração de matérias-primas até as etapas de produção, transporte, construção, uso e descarte, cada fase contribui para a pegada de carbono total de uma obra (Faria, 2024). Nesse contexto, as fundações representam uma etapa particularmente relevante, pois envolvem materiais intensivos em carbono, como cimento e aço, além da utilização de equipamentos mecanizados que demandam elevado consumo energético (Lara, 2024).

No Brasil, fatores locais, como a origem dos materiais, os métodos executivos e a eficiência dos maquinários empregados, influenciam diretamente o volume de emissões associadas às fundações (Giaquinto, 2024). Apesar da relevância desse tema, ainda existe uma lacuna significativa na disponibilidade de ferramentas práticas que permitam estimar, de forma rápida e acessível, as emissões de carbono associadas a diferentes tipos de fundações profundas em condições típicas do mercado brasileiro. Em particular, estudos comparativos aplicados às estacas raiz e às estacas hélice contínua ainda são limitados, especialmente quando considerados parâmetros operacionais e construtivos utilizados na prática profissional.

Diante dessa lacuna, esta dissertação propõe o desenvolvimento de uma calculadora de estimativa de emissões de carbono aplicada às fundações profundas, com foco nas estacas raiz e hélice contínua. A ferramenta foi concebida para auxiliar projetistas, construtores e gestores de obras na quantificação preliminar das emissões associadas a diferentes soluções de fundação,

permitindo comparações entre alternativas técnicas ainda na fase de planejamento. Dessa forma, a calculadora contribui para incorporar critérios ambientais no processo de tomada de decisão em projetos de fundações.

A quantificação das emissões possibilita identificar oportunidades de mitigação e potenciais ganhos associados a mecanismos de mercado, como os créditos de carbono, que incentivam práticas construtivas de menor impacto ambiental (Oyewale; Bassey, 2024). Este trabalho apresenta um caráter inovador ao integrar conceitos de avaliação ambiental com uma ferramenta computacional aplicada ao contexto das fundações profundas, oferecendo suporte técnico para decisões mais sustentáveis no setor da construção civil. Os resultados também podem subsidiar políticas públicas, certificações ambientais e iniciativas alinhadas às metas do Acordo de Paris e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (Scarano *et al.*, 2021).

1.2 Objetivos

São apresentados, a seguir, os objetos geral e específicos do trabalho.

1.2.1 Objetivo Geral

A pesquisa avalia emissão e neutralização de emissão de carbono na execução de fundações, considerando as principais soluções de fundações profundas adotadas em projetos em Fortaleza, no caso estaca tipo hélice contínua e estaca tipo raiz.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar as emissões de carbono associadas aos principais insumos e processos envolvidos na execução de fundações profundas do tipo estaca raiz e estaca hélice contínua.
- Avaliar a contribuição relativa das diferentes etapas executivas e dos materiais empregados na composição da pegada de carbono dessas fundações.
- Analisar comparativamente o desempenho ambiental das estacas raiz e das estacas hélice contínua, considerando indicadores de emissões normalizadas por volume de fundação executada.
- Investigar os fatores técnicos e operacionais que influenciam a variabilidade das emissões de carbono entre as tipologias de fundações analisadas.
- Estimar o potencial de neutralização das emissões de carbono associadas à execução das

fundações estudadas, com base em estratégias de compensação ambiental.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, além desta introdução. No Capítulo 2 é apresentado o referencial teórico que fundamenta a pesquisa, abordando os conceitos de sustentabilidade aplicados à construção civil, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), os aspectos técnicos relacionados às estacas raiz e às estacas hélice contínua, bem como os principais padrões, normas e protocolos internacionais utilizados na quantificação das emissões de gases de efeito estufa, com destaque para o GHG Protocol, a ISO 14064 e a PAS 2080 (Navaei *et al.*, 2024; Samara *et al.*, 2022). O capítulo contempla ainda os fundamentos computacionais que embasam o desenvolvimento da ferramenta de cálculo de emissões, incluindo o uso da linguagem Python e de bibliotecas voltadas à análise e visualização de dados, como Pandas e Matplotlib.

No Capítulo 3 são descritos os materiais e métodos adotados no estudo, detalhando-se a abordagem metodológica, os procedimentos de levantamento e estruturação dos dados, a definição das fronteiras do sistema, a aplicação da metodologia de cálculo das emissões de carbono e a validação dos resultados com base em dados provenientes de obras reais.

O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos a partir da aplicação da ferramenta computacional desenvolvida, contemplando a quantificação das emissões de carbono associadas às estacas raiz e às estacas hélice contínua, a comparação entre as tipologias de fundações analisadas e a avaliação das estratégias de neutralização de carbono consideradas no estudo.

Por fim, o Capítulo 5 reúne as conclusões do trabalho, destacando as principais contribuições da pesquisa, suas limitações e recomendações para estudos futuros voltados à avaliação e mitigação das emissões de carbono em fundações profundas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este referencial teórico reúne os fundamentos conceituais e metodológicos necessários para a pesquisa, contemplando a sustentabilidade na construção civil, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), os fundamentos técnicos das estacas raiz e hélice contínua, bem como normas e protocolos internacionais aplicados à quantificação das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Inclui ainda, de forma complementar, os aspectos computacionais relacionados ao desenvolvimento de uma calculadora em Python, utilizada como ferramenta de apoio para a estimativa e a comparação das emissões.

2.1 Sustentabilidade na Construção Civil e Emissões de Carbono

A avaliação da emissão de carbono na execução de estacas raiz e hélice contínua se insere em um campo interdisciplinar que abrange a sustentabilidade na construção civil, as metodologias de avaliação ambiental e o impacto das emissões de gases de efeito estufa (GEE) (Li; Zheng, 2020). .

No Brasil, a crescente demanda por infraestrutura urbana e edificações intensifica o consumo de materiais de alto impacto, como aço e concreto, e reforça a necessidade de práticas sustentáveis (Benites, 2023). As metas globais, como o Acordo de Paris (2015) e os ODS da Organização das Nações Unidas (ONU) (Frazao; Valadão; Calegario, 2022), têm impulsionado o setor a buscar inovações tecnológicas e estratégias que reduzam a pegada de carbono das edificações (Leme, 2021).

O conceito de pegada de carbono, definido como a totalidade de emissões de GEE associadas a um processo ou produto, é central para a avaliação do impacto ambiental das fundações. Estudos recentes demonstram que a adoção de técnicas construtivas eficientes e o uso de materiais de menor intensidade de carbono podem reduzir significativamente essas emissões (Behera *et al.*, 2024).

2.2 Avaliação do Ciclo de Vida

Nas últimas décadas, a intensificação dos impactos ambientais decorrentes das atividades humanas tem impulsionado o desenvolvimento de instrumentos metodológicos capazes de avaliar os impactos ambientais associados a essas atividades, especialmente no que se refere ao consumo de recursos naturais, à geração de resíduos e às emissões de poluentes ao longo

dos processos produtivos. Nesse contexto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), conhecida internacionalmente como *Life Cycle Assessment* / Avaliação do Ciclo de Vida (LCA). É uma ferramenta para quantificar sistematicamente o desempenho ambiental de produtos ou processos ao longo de todo o seu ciclo de vida, incluindo extração de matéria-prima, fabricação, uso e descarte e reciclagem em fim de vida. Portanto, a ACV é frequentemente considerada uma abordagem "do berço ao túmulo" para a avaliação dos impactos ambientais (Pomponi; Monscaster, 2016). No âmbito quantitativo, a ACV aplicada à mensuração da pegada de carbono baseia-se na agregação das emissões de gases de efeito estufa associadas aos diversos fluxos do sistema analisado. De forma geral, a emissão total de carbono equivalente pode ser expressa conforme a Equação 2.1.

$$E_{ACV} = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot FE_i \quad (2.1)$$

em que E_{ACV} representa a emissão total de gases de efeito estufa em toneladas de CO₂ equivalente (tCO₂e); Q_i corresponde à quantidade do insumo ou processo i ; FE_i é o fator de emissão associado a esse insumo ou processo; e n representa o número total de fluxos considerados dentro das fronteiras do sistema.

A aplicação da ACV assume especial relevância no setor da construção civil, notoriamente caracterizado por seu elevado consumo de recursos naturais, intensa demanda energética e significativa geração de resíduos sólidos. Por meio dessa metodologia, torna-se possível identificar e quantificar emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), o consumo de energia e de recursos naturais, entre outros indicadores ambientais, em todas as etapas do ciclo de vida de edificações e obras de infraestrutura, como fundações, pavimentação e estruturas de suporte (Oliveira, 2007).

As discussões internacionais acerca da relação entre desenvolvimento humano e degradação ambiental surgiram por volta da década de 1960, período em que cresceram as preocupações com os riscos de degradação ambiental (Figura 1). Destaca-se a criação do Clube de Roma em 1968, por Aurelio Peccei, que reuniu intelectuais, economistas, industriais e representantes da sociedade civil para refletir sobre os limites do crescimento econômico frente às restrições ecológicas e sociais do planeta. O primeiro grande fruto desse movimento foi o relatório “Os Limites do Crescimento” (1972), que projetava cenários futuros de colapso caso os padrões de consumo e expansão populacional se mantivessem inalterados. Esse documento ressaltou o debate internacional, ao inserir a questão ambiental no centro da formulação de políticas globais (Mazzutti, 2023).

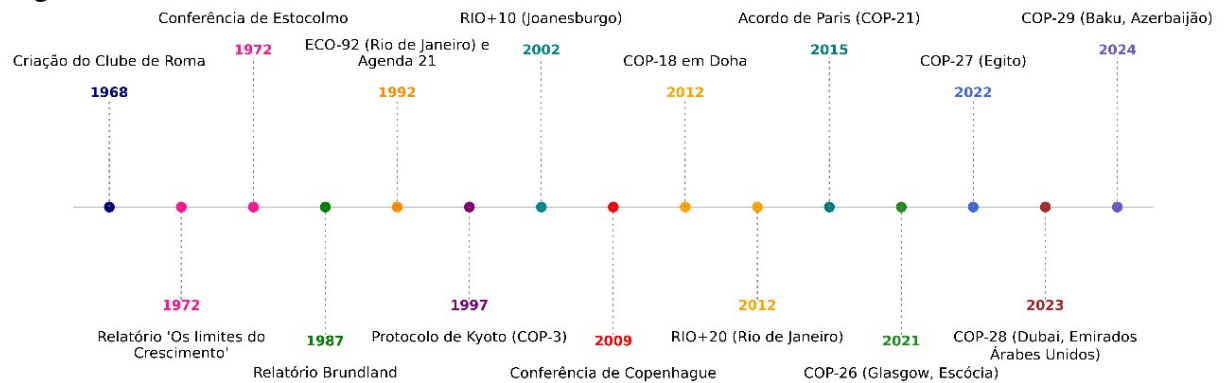
Com a crescente conscientização, a Conferência de Estocolmo (1972), promovida pela ONU, foi o primeiro encontro internacional com foco na proteção ambiental (Martínez; Brito; Balcázar, 2025). A conferência produziu uma declaração de princípios, reconhecendo a urgência de compatibilizar o progresso humano com a preservação da natureza. Anos mais tarde, o Relatório Brundtland (1987) ampliou essa discussão ao propor o conceito de desenvolvimento sustentável, articulando dimensões sociais, econômicas e ambientais em uma visão integradora, que se tornaria referência para políticas públicas e iniciativas privadas nas décadas seguintes (Browne *et al.*, 2023).

A partir de então, o debate internacional assumiu caráter institucionalizado, com uma sequência de conferências que buscaram transformar princípios em compromissos concretos. A ECO-92, no Rio de Janeiro, foi decisiva nesse processo, resultando na Agenda 21 e em convenções sobre mudanças climáticas e biodiversidade. Posteriormente, o Protocolo de Kyoto (1997) representou a primeira tentativa de estabelecer metas obrigatórias de redução de emissões de gases de efeito estufa, embora com limitações em sua implementação (Lass; Mendonça, 2025). Nos anos seguintes, encontros como a RIO + 10 (2002), a *Conference of the Parties / Conferência das Partes (COP)* de Copenhague (2009) e a RIO + 20 (2012) mantiveram o debate vivo, ainda que permeado por tensões entre países desenvolvidos e em desenvolvimento quanto à distribuição de responsabilidades (Mehta; Leach; Scoones, 2025).

O Acordo de Paris, firmado em 2015, na França, estabeleceu metas de redução de emissões, incentivando a descarbonização das cadeias produtivas e a adoção de tecnologias de baixo carbono. Essa trajetória transformou a neutralização de carbono de uma política originalmente vinculada a tratados internacionais para uma estratégia de governança ambiental, articulando setores público e privado no enfrentamento dos desafios globais impostos pelas mudanças climáticas (Xie *et al.*, 2023).

A COP-26 (2021) avançou na regulamentação do Artigo 6 do Acordo de Paris (2015), definindo regras para o mercado global de carbono. A COP-27 (2022) reforçou a necessidade de maior ambição nas Contribuições Nacionalmente Determinadas. Na COP-28 (2023), o foco recaiu sobre a transição energética e a redução da dependência de combustíveis fósseis, enquanto a COP-29 (2024) buscou estruturar um novo ciclo de financiamento climático para países em desenvolvimento. Esses encontros avançaram na regulamentação do mercado de carbono e na revisão de compromissos climáticos, evidenciando tanto progressos quanto a persistência de desafios globais. (Campello; Lima, 2018; Nascimento *et al.*, 2024).

Figura 1 — Histórico das Conferências e Acordos Ambientais Internacionais



Fonte: Autora (2025).

É nesse cenário que a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) se insere como uma ferramenta científica e metodológica essencial. Ao quantificar os impactos ambientais associados a produtos, processos e serviços desde a extração de matérias-primas até a disposição final, a ACV fornece subsídios técnicos para decisões fundamentadas em sustentabilidade, aproximando os compromissos globais das práticas concretas de gestão ambiental e inovação tecnológica (Buyle; Braet; Audenaert, 2013).

A ACV tem se consolidado como uma ferramenta essencial para a mensuração acurada dos impactos ambientais associados às diferentes fases de um empreendimento, desde a extração de matérias-primas até a disposição final (Khasreen; Banfill; Menzies, 2009). No contexto das fundações profundas, como estacas raiz e hélice contínua, a ACV permite identificar as etapas mais críticas em termos de emissão de gases de efeito estufa, contribuindo para decisões mais sustentáveis desde a fase de projeto (ISO 14040, 2006). Isso inclui o transporte dos materiais, o consumo energético dos equipamentos de perfuração e concretagem, e o descarte de resíduos gerados durante a execução.

Aplicando-se a metodologia da ACV à construção civil (Figura 2), é possível decompor o ciclo das fundações em quatro etapas principais: produção e transporte dos insumos como cimento, aço e aditivos, execução da obra, mobilização de máquinas, energia consumida, operação e manutenção, embora geralmente mínima em fundações, e o fim de vida útil, demolição e destinação dos resíduos (Backes; Traverso, 2021). Essa abordagem permite não apenas quantificar as emissões em cada fase, mas também avaliar oportunidades de mitigação e uso de materiais alternativos de menor impacto ambiental (Neto; Filho, 2013).

2.3 Fundamentos Técnicos das Estacas Raiz e Hélice Contínua

As fundações profundas, especialmente as estacas raiz e hélice contínua, são amplamente empregadas no Brasil devido à sua adaptabilidade a subsuperfícies de diferentes estratigrafias e à sua capacidade de suportar cargas estruturais elevadas (Silveira *et al.*, 2022).

A estaca raiz é moldada in loco e possui alta capacidade de carga, baseada essencialmente predominantemente na resistência de atrito lateral. Ela é totalmente armada e preenchida com argamassa de cimento e areia, e sua perfuração é executada por perfuratriz rotativa ou rotopercussiva e em terreno com solo é revestida totalmente por tubos metálicos recuperáveis. Em terrenos com maciço rochoso não se faz necessário a utilização de tubos metálicos, desta forma há uma diminuição do diâmetro da estaca, o que deve ser sempre considerado no dimensionamento pelo projetista de fundações (Silva, 2020b). No entanto, o consumo elevado de cimento e a demanda por equipamentos especializados contribuem para uma significativa emissão de carbono.

Estacas hélice contínua são executadas por meio de perfuração contínua e concretagem simultânea, são reconhecidas pela rapidez de execução e menor impacto em áreas urbanas. Apesar dessas vantagens, o processo exige grandes volumes de concreto e aço, além de maquinário pesado, o que impacta as emissões de carbono associadas (Sandoval; Cunha, 2024).

As estacas raiz, cuja execução demanda maior tempo e consumo energético devido à perfuração (rotativa ou rotopercussiva) e pressão de argamassa de cimento e areia com posterior aplicação de pressão, os impactos na fase de obra tendem a ser mais expressivos (Monteiro; Moura; Aguiar, 2019). Já as estacas do tipo hélice contínua, por utilizarem um processo mecanizado contínuo de perfuração e concretagem simultânea, podem apresentar menor emissão relativa, principalmente se associadas a insumos regionais e maquinário moderno com menor consumo energético (Brown *et al.*, 2007).

2.3.1 Estaca Raiz

A estaca raiz constitui um importante marco no desenvolvimento das fundações profundas modernas, caracterizando-se pela elevada versatilidade e pela possibilidade de aplicação em condições geotécnicas e ambientais adversas (Lourenço *et al.*, 2023). Trata-se de um tipo de estaca moldada in loco, executada por meio de perfuração rotativa, com uso de circulação de água ou ar comprimido, revestimento metálico provisório e posterior preenchimento com arga-

Figura 2 — Avaliação do Ciclo de Vida na Construção Civil.



Fonte: Autor (2024).

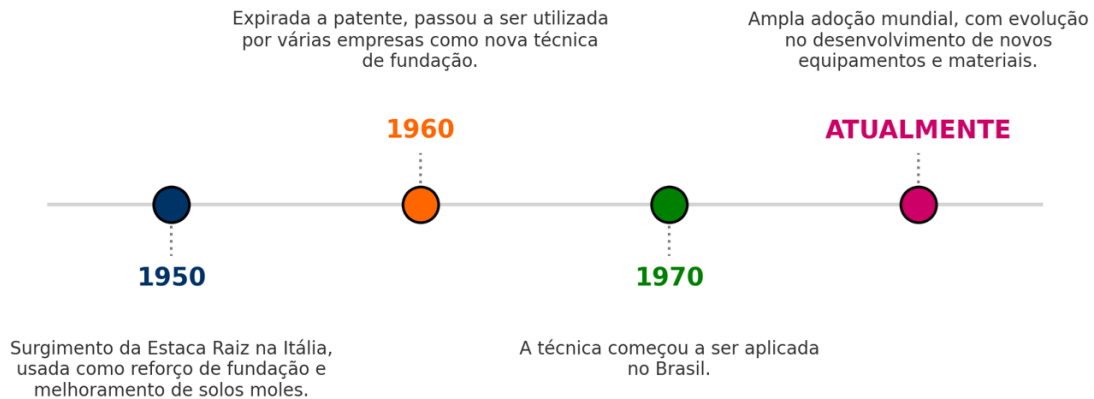
massa de cimento. Sua criação está diretamente associada ao avanço tecnológico da engenharia de fundações no período pós-guerra, momento em que novas técnicas surgiram em resposta à crescente demanda por soluções seguras e adaptáveis em terrenos de difícil acesso ou com restrições construtivas.

O desenvolvimento da estaca raiz remonta à década de 1950, na Itália, onde a técnica foi inicialmente empregada como sistema de reforço de fundações existentes e de estabilização de solos com baixa capacidade de suporte (Stucchi *et al.*, 2014) (Figura 3). A concepção original partiu da necessidade de atender obras urbanas em espaços confinados e com presença de construções vizinhas, nas quais métodos tradicionais de fundação apresentavam limitações. Após o término da patente, na década de 1960, a tecnologia passou a ser amplamente disseminada e adaptada por diferentes empresas e centros de pesquisa, sendo considerada uma das primeiras técnicas de fundações profundas a integrar, de forma sistemática, os conceitos de injeção sob pressão controlada (Falconi *et al.*, 1998).

A técnica chegou ao Brasil na década de 1970, inicialmente aplicada em obras de recuperação e reforço de fundações em centros urbanos. Seu emprego rapidamente se expandiu em função de suas características executivas: diâmetros reduzidos, que variam entre 150 mm e 400 mm; possibilidade de execução em profundidades superiores a 50 m; e elevada capacidade de carga, alcançada pelo efeito da injeção da argamassa sob pressão, que melhora as condições de contato solo-estaca (Cintra; Aoki, 2011; Pinto, 2016). Ao longo das décadas seguintes, a

estaca raiz consolidou-se como uma das soluções preferenciais para reforço de fundações de edificações históricas, obras de contenção em taludes e escavações profundas, além de estruturas em áreas urbanas densamente ocupadas.

Figura 3 — Histórico Estaca Raíz.



Fonte: Autora (2025).

Do ponto de vista executivo, o processo de instalação da estaca raiz pode ser dividido em quatro etapas principais. Inicialmente, realiza-se a perfuração do solo com auxílio de trado ou martetele rotativo ou rotopercussivo, utilizando revestimento metálico provisório que garante a estabilidade das paredes da perfuração. Na sequência, é introduzida uma armadura metálica tubular, projetada para resistir às solicitações estruturais (Alonso, 2019). Posteriormente, ocorre a injeção sob pressão de argamassa de cimento e areia, com posterior aplicação de pressão com retirada gradativa do revestimento metálico, processo que garante o preenchimento do fuste e a melhoria das condições de interface entre o concreto e o solo. Por fim, após a cura do material, a estaca passa a integrar o sistema de fundação ou de reforço da estrutura (Stucchi *et al.*, 2014) (Figura 4). A execução da estaca raiz demanda o uso de equipamentos especializados, destacando-se a perfuratriz rotativa ou rotopercussiva, responsável pela escavação do solo em conjunto com revestimento metálico provisório, que assegura a estabilidade das paredes da perfuração (Figura 5).

Entre as principais vantagens da estaca raiz destacam-se: (i) a possibilidade de execução em locais com restrição de espaço ou altura; (ii) o baixo nível de vibração e ruído, aspecto relevante em áreas urbanas e sensíveis; (iii) a flexibilidade quanto ao tipo de solo, podendo ser aplicada em solos moles, argilosos, arenosos ou mesmo em rochas brandas; e (iv) a capacidade de reforçar fundações existentes sem comprometer a integridade das estruturas em serviço (Cintra; Aoki, 2011). Por outro lado, algumas limitações também são reportadas,

como a baixa produtividade quando comparada a estacas hélice contínua monitorada ou a estacas pré-moldadas, além da necessidade de equipamentos especializados e mão de obra qualificada.

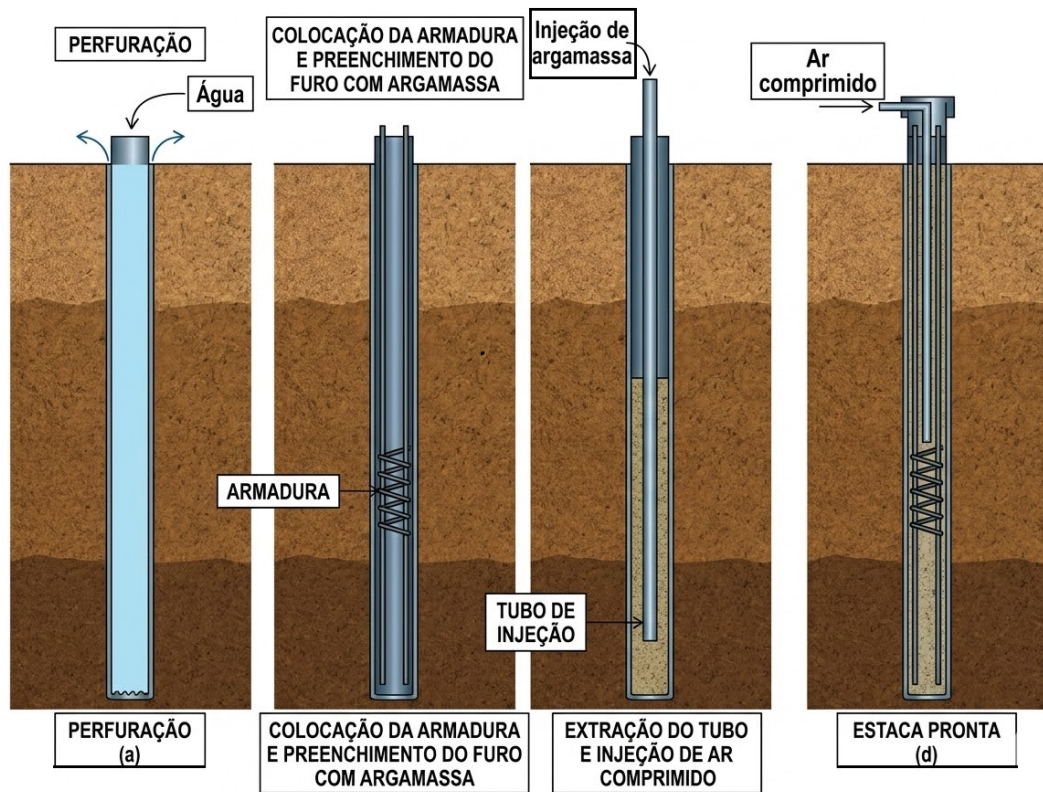
Atualmente, a estaca raiz é amplamente reconhecida como uma técnica eficiente, consolidada no Brasil e no exterior, sendo aplicada em projetos de reforço estrutural, estabilização de encostas, obras metroviárias e fundações em terrenos de difícil acesso ou com subsuperfície com elevada resistência (Cui, Ren; Yin, 2021). Sua importância não reside apenas em sua capacidade de atender a condições adversas, mas também no fato de ter introduzido, de maneira pioneira, conceitos de execução e injeção que influenciaram o desenvolvimento de outras técnicas de fundações modernas.

Figura 4 — Execução Estaca Raíz.



Fonte: Autora (2025).

Figura 5 — Etapas de Execução Estaca Raiz.



Fonte: Adaptado de Veloso e Lopes (2012).

2.3.2 Estaca Hélice Contínua

As fundações profundas constituem elementos estruturais fundamentais em obras de engenharia, sendo responsáveis por transmitir as cargas das edificações para camadas mais resistentes do subsolo. Dentre as diversas alternativas disponíveis, a estaca hélice contínua representa um dos métodos mais difundidos e tecnologicamente avançados nas últimas décadas, destacando-se pela rapidez de execução, elevado controle tecnológico e menor impacto ambiental (Cintra; Aoki, 2011; Brown *et al.*, 2007).

De acordo com a Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) 6122 (ABNT, 2022), a estaca hélice contínua é classificada como um tipo de estaca moldada *in loco*, executada por meio de um trado helicoidal contínuo, no qual o concreto é introduzido sob pressão pelo interior da haste durante a retirada da ferramenta. Esse processo garante a integridade do fuste e permite a execução de estacas em diferentes tipos de solo, desde argilosos até arenosos, com diâmetros que podem ultrapassar 1.000 mm e profundidades superiores a 30 m (Albuquerque, 2001).

A execução da estaca hélice ocorre em três etapas fundamentais (Figura 6 e 7). Primeiramente, realiza-se a perfuração do solo por meio de um trado helicoidal contínuo, até

atingir a profundidade especificada em projeto. Em seguida, inicia-se a concretagem sob pressão, realizada simultaneamente à retirada do trado, o que evita a descompressão lateral do solo e garante a integridade da estaca. Por fim, procede-se à inserção da armadura metálica, imediatamente após a concretagem, aproveitando o estado fresco do concreto para assegurar a adequada integração estrutural (Bungenstab; Beim, 2015).

Figura 6 — Execução Estaca Hélice Contínua. Monitorada.

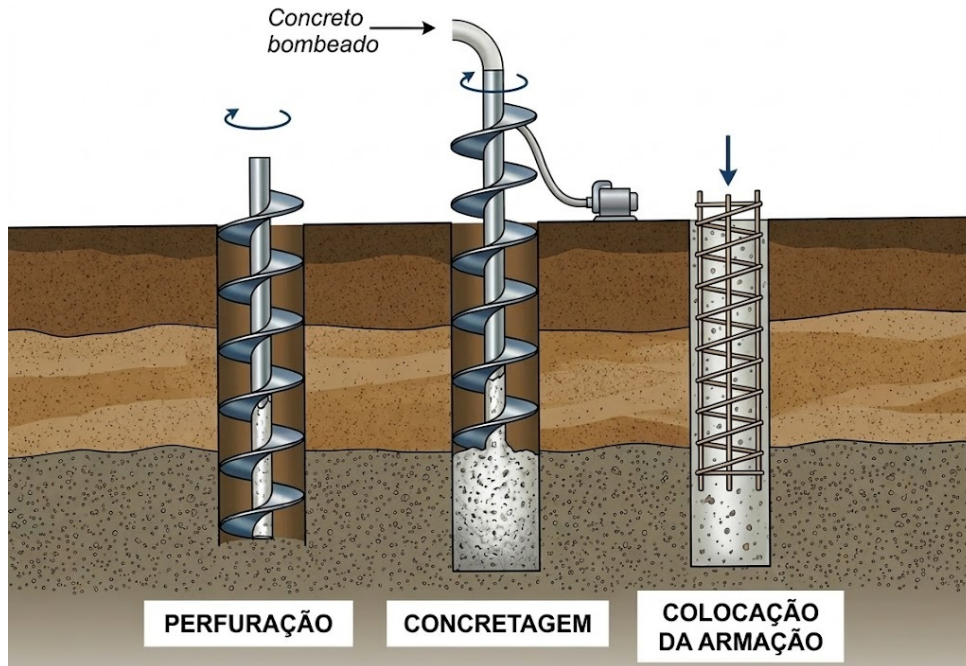


Fonte: Autora (2025).

Um dos principais diferenciais dessa técnica está no monitoramento em tempo real do processo executivo. Sistemas informatizados permitem o registro contínuo de parâmetros como profundidade de perfuração, torque aplicado, volume de concreto injetado e pressão de bombeamento. Esses dados são compilados em relatórios que asseguram a rastreabilidade e a qualidade da execução (Pinto, 2016), conferindo à estaca hélice uma vantagem significativa em relação a outras soluções de fundação profunda. Essa característica torna a técnica especialmente adequada para obras de grande porte e ambientes urbanos, onde a mitigação de vibrações e ruídos é uma exigência crítica.

Sob uma perspectiva comparativa, a estaca hélice contínua apresenta vantagens relevantes frente às estacas escavadas tradicionais. Entre os principais benefícios destacam-se a maior produtividade, a ausência de vibrações intensas e ruídos durante a execução, o controle

Figura 7 — Execução Estaca Hélice Contínua Monitorada.



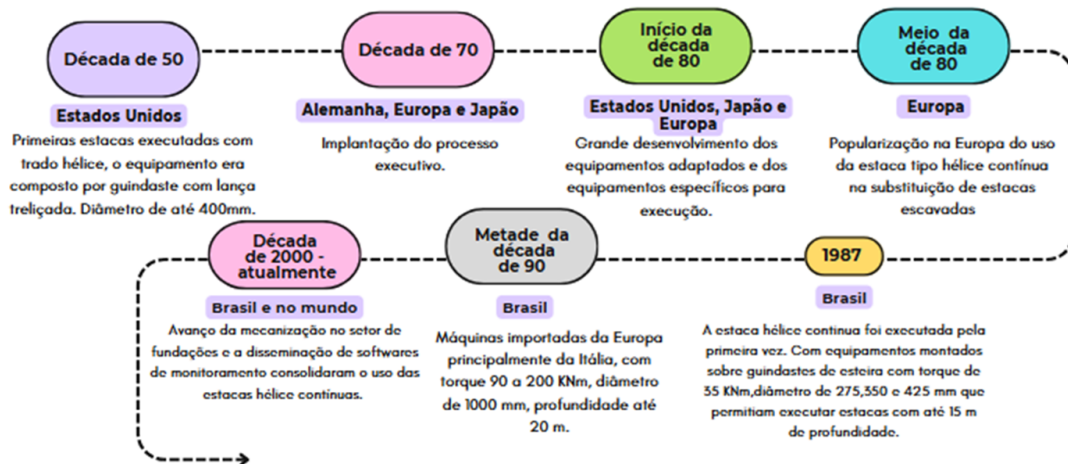
Fonte: Adaptado de Veloso e Lopes (2012).

rigoroso dos parâmetros operacionais e o menor impacto ambiental e urbano (Brown, 2005). No entanto, a técnica também impõe desafios técnicos, como a necessidade de equipamentos de grande porte, o custo inicial elevado para mobilização e limitações em terrenos com elevada resistência ou presença de matacões e blocos rochosos (Filho, 2016).

A técnica de estacas hélice contínua surgiu à década de 1950 (Figura 8), nos Estados Unidos, quando foram executadas as primeiras estacas com trado hélice, utilizando guindastes equipados com lança treliçada. Essas estacas apresentavam diâmetro de até 400 mm e representaram um marco inicial na mecanização dos processos de fundação profunda (Tan; Wang, 2013). Na década de 1970, a tecnologia expandiu-se para países da Europa, especialmente Alemanha, bem como para o Japão, momento em que se consolidou a padronização dos processos executivos (Pinto, 2016).

No início da década de 1980, observou-se um salto tecnológico significativo, quando Estados Unidos, Japão e Europa passaram a investir fortemente no desenvolvimento de equipamentos dedicados à execução da hélice contínua, projetados para atender a maiores exigências de torque, profundidade e controle de concretagem (Toscano *et al.*, 2022). Ainda nesse período, sobretudo na segunda metade dos anos 1980, a técnica se popularizou na Europa, destacando-se como alternativa às estacas escavadas, devido à rapidez de execução, à redução de vibrações

Figura 8 — Histórico Estaca Hélice Continua.



Fonte: Autora (2025).

e ruídos e à possibilidade de execução em áreas urbanas densamente ocupadas (Cintra; Aoki, 2011).

No contexto brasileiro, a primeira execução ocorreu em 1987, no bairro de Pinheiros, na cidade de São Paulo (SP), quando se utilizaram guindastes de esteira adaptados, com torque de aproximadamente 35kNm, capazes de executar estacas com diâmetros entre 275 mm e 425 mm e profundidade máxima de 15m (Antunes e Tarozzo, 1996). Essa introdução representou um marco importante, possibilitando a adaptação da técnica às condições de solo nacionais. Na metade da década de 1990, houve a consolidação do método no Brasil, com a importação de equipamentos da Europa, principalmente da Itália. Essas máquinas alcançavam torques de 90 a 200 kNm, permitindo a execução de estacas de até 1000 mm de diâmetro e profundidades próximas de 20 m, ampliando consideravelmente a aplicabilidade da técnica (Cintra; Aoki, 2011).

A execução da estaca hélice contínua é realizada por meio de equipamentos de grande porte, compostos principalmente por perfuratriz equipada com trado helicoidal contínuo, capaz de executar a perfuração e a concretagem de forma simultânea (Cintra e Aoki, 2011). Durante a retirada do trado, o concreto é bombeado sob pressão através da haste central, assegurando a integridade do fuste e evitando a descompressão lateral do solo. Após a concretagem, uma grua ou dispositivo auxiliar insere a armadura metálica no concreto ainda fresco, permitindo a integração estrutural (Brown *et al.*, 2007). O processo é monitorado por sistemas informatizados que registram parâmetros como profundidade, torque aplicado, pressão de bombeamento e volume de concreto injetado, garantindo rastreabilidade e qualidade da execução. A operação envolve ainda o consumo significativo de óleo diesel nos motores de perfuração e bombeamento,

refletindo-se nas emissões de gases de efeito estufa associadas à técnica (Pinto, 2016).

A partir da década de 2000, a estaca hélice contínua consolidou-se definitivamente no cenário mundial. O avanço da mecanização, aliado à disseminação de softwares de monitoramento da execução, permitiu maior controle de parâmetros como torque, profundidade, volume de concreto e pressão de injeção. Essa inovação possibilitou não apenas maior qualidade e rastreabilidade, mas também maior segurança em obras de grande porte, estabelecendo a estaca hélice contínua como técnica de referência no setor de fundações profundas (Toscano *et al.*, 2022).

2.4 Padrões de Pegada de Carbono

Diversos padrões e métodos foram desenvolvidos globalmente para avaliar a pegada de carbono de organizações, produtos e projetos, refletindo a crescente preocupação com a sustentabilidade e a necessidade de mensuração acurada das emissões. Esses padrões podem ser classificados em duas categorias principais: padrões corporativos e padrões de produtos.

Os padrões corporativos têm como foco principal o cálculo da pegada de carbono de uma organização como um todo, considerando todas as atividades que geram emissões de gases de efeito estufa (GEE), direta ou indiretamente (Walenta, 2021). Já os padrões de produtos concentram-se na avaliação de emissões associadas a produtos ou projetos específicos, incorporando frequentemente elementos da análise do ciclo de vida (ACV) para capturar os impactos em todas as etapas, desde a produção de materiais até o descarte final (Burchart; Przytuła, 2024).

A seguir, são apresentados alguns dos principais padrões utilizados para mensurar a pegada de carbono (Virgens; Andrade; Hidalgo, 2020).

- Padrões corporativos:
 - GHG Protocol *Corporate Accounting and Reporting Standard*
 - ISO 14064
 - Intergovernmental Panel on Climate Change (*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC)) Accounting and Reporting Guidelines
- Padrões de produtos:
 - GHG Protocol Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard
 - PAS 2080
 - ISO 14040

– ISO 14044

2.4.1 Padrão GHG Protocol

O GHG Protocol (Greenhouse Gas Protocol) é uma das metodologias mais reconhecidas para a quantificação e gestão de emissões de GEE. O Protocolo de Gases de Efeito Estufa (GHG Protocol) é um padrão amplamente utilizado para contabilizar e relatar emissões de gases de efeito estufa (Daneshgar *et al.*, 2024). Ele permite que empresas, cidades e países meçam, gerenciem e relatem suas emissões de gases de efeito estufa de suas operações e cadeias de valor. O protocolo também aborda a inclusão de emissões do setor de terras e remoções de CO₂, fornecendo um caminho para a contabilidade e relatórios credíveis de remoções de carbono para acompanhar o progresso das empresas em direção a metas climáticas líquidas zero (Liu *et al.*, 2024).

2.4.2 ISO 14064

A International Organization for Standardization (ISO) é a maior desenvolvedora e editora de padrões internacionais do mundo. Como uma organização não governamental, a ISO atua como uma ponte entre os setores público e privado. As diretrizes da NBR ISO 14064 (ABNT, 2022) fornecem um conjunto integrado de ferramentas para governos, empresas, regiões e outras organizações, visando medir, quantificar e reduzir as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). A NBR ISO 14064 (ABNT, 2022) é dividida em três partes. A NBR ISO 14064-1 (ABNT, 2022) oferece orientação para o gerenciamento organizacional, quantificação e notificação de emissões e remoções de GEE. A NBR ISO 14064-2 (ABNT, 2022) especifica e orienta projetos para quantificação, monitoramento e elaboração de relatórios sobre reduções de emissões ou melhorias nas remoções desses gases. Já a ABNT NBR ISO 14064-3 (ABNT, 2007) detalha as técnicas de validação e verificação de declarações relativas a GEE. O desenvolvimento do inventário de GEE segue etapas como atribuição de limites organizacionais e operacionais, identificação de fontes e sumidouros, quantificação de emissões diretas e indiretas, e elaboração de relatórios (Wintergreen; Delaney, 2007).

A NBR ISO 14064-2 (ABNT, 2022) introduz o princípio do conservadorismo, que consiste na utilização de hipóteses, valores e procedimentos conservadores para assegurar que as reduções de emissão ou melhorias de remoções de GEE não sejam superestimadas. As etapas iniciais da parte dois são semelhantes às do inventário da NBR ISO 14064-1 (ABNT, 2022), mas

a identificação de fontes, sumidouros e reservatórios de GEE é restrita ao escopo do projeto.

Por fim, a terceira parte da norma especifica os requisitos para selecionar validadores e verificadores de GEE, estabelecendo o nível de confiança, objetivos, critérios e escopo, determinando a abordagem da validação e verificação NBR ISO 14064-3 (ABNT, 2007). O Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) também desempenha um papel crucial, com metodologias reconhecidas mundialmente para calcular e reportar emissões de GEE.

2.4.3 PAS 2080

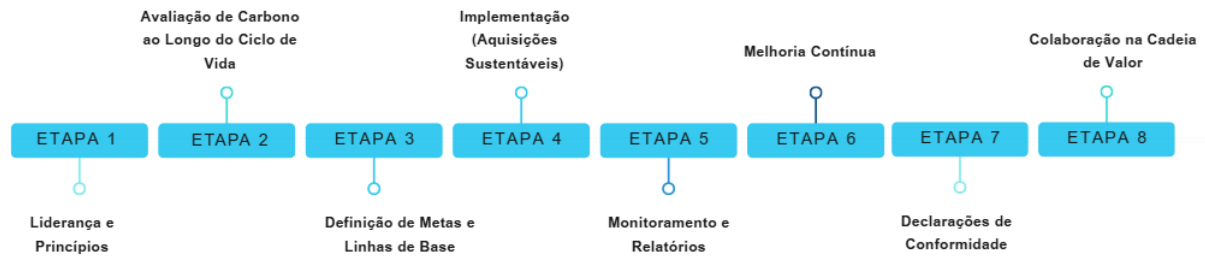
A Especificação Publicamente Disponível 2080 (PAS 2080) foi criada para atender à necessidade da indústria da construção do Reino Unido em agilizar a gestão de carbono em projetos de infraestrutura (McAlinden, 2016). Implementada em 2016, é a primeira especificação mundial que detalha um processo para reduzir emissões de carbono ao longo de todo o ciclo de vida de projetos de infraestrutura. A PAS 2080 fornece uma metodologia padronizada para a coleta de dados, avaliação comparativa, definição de linha de base, quantificação e relatórios de carbono, promovendo uma abordagem colaborativa entre proprietários, gestores e demais envolvidos na cadeia de valor (Green, 2021).

A especificação busca integrar toda a cadeia de valor em uma nova cultura de projeto e construção que desafie práticas convencionais, promovendo a inovação para reduzir custos e emissões. Seus princípios-chave definem responsabilidades claras para todas as partes envolvidas, incentivando a colaboração em todas as fases do projeto. Esse alinhamento é essencial para garantir que as soluções adotadas sejam sustentáveis, inovadoras e eficientes em termos de carbono, estimulando o setor a ultrapassar limites tradicionais e explorar novas possibilidades tecnológicas (Gieseke, 2016).

O processo de gestão de carbono segundo a PAS 2080 é dividido em oito etapas principais (Figura 9). Durante a Estratégia, o proprietário ou gestor define as metas e as unidades funcionais do ativo, com a participação de projetistas e outros membros da cadeia de valor. Na fase de Apresentação, o escopo inicial e o programa de trabalho são definidos, permitindo a interação entre gestores, projetistas e construtores. A etapa de conceito e definição envolve a avaliação de opções e a escolha da mais viável antes do desenvolvimento detalhado no projeto, onde oportunidades adicionais de redução de carbono são exploradas (Navaei *et al.*, 2024).

As fases finais incluem construção e comissionamento, onde a infraestrutura é fisicamente entregue, e transferência e encerramento, quando o ativo é preparado para uso. Na

Figura 9 — Etapas PAS 2080.



Fonte: Autora (2025).

fase de operação, o desempenho da infraestrutura é continuamente otimizado para minimizar as emissões. Por último, o fim de vida dos ativos exige uma abordagem sustentável, semelhante ao tratamento dado a novos ativos, garantindo que todo o ciclo de vida seja orientado para a redução do impacto ambiental (Suryan; Daoutis; Girrbaach, 2020).

2.4.4 ISO 14040 e ISO 14044

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia sistemática que considera todo o ciclo de vida de um produto, desde a extração das matérias-primas até o descarte final, com foco em minimizar impactos ambientais. Este processo abrange as fases de produção de materiais, uso de equipamentos, desenvolvimento do produto final e a gestão de resíduos, incluindo alternativas de reutilização, reciclagem ou disposição final (Carneiro; Santos; Borja, 2024).

A ABNT NBR ISO 14040 (2014) define a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) como a análise das entradas, saídas e impactos ambientais potenciais de um produto ao longo de todas as suas fases, desde a extração de recursos até a disposição final. Essa metodologia avalia a carga ambiental em etapas como processamento de matérias-primas, produção, embalagem, distribuição, uso e gestão de resíduos, abrangendo reutilização, reciclagem ou descarte. O conjunto desses processos é denominado "sistema de produto", proporcionando uma visão integrada para decisões sustentáveis e redução de impactos ambientais (ABNT NBR ISO 14040, 2014).

A ACV, segundo a ABNT NBR ISO 14044 (2014), é conduzida em quatro fases

distintas: definição do objetivo e escopo, levantamento do Inventário de Ciclo de Vida (ICV), avaliação dos impactos ambientais e interpretação dos resultados. A primeira fase da ACV consiste em determinar a finalidade e o escopo da análise, definindo as fronteiras do sistema e os critérios de avaliação. Na segunda fase, o inventário é levantado, considerando as entradas e saídas do sistema, como o consumo de energia, materiais e as emissões geradas. A terceira fase transforma os dados do inventário em indicadores de impacto ambiental, classificando-os em categorias como emissões de gases de efeito estufa, consumo de recursos naturais e geração de resíduos. Por fim, a quarta fase interpreta os resultados, permitindo a aplicação prática das conclusões e a verificação de sua conformidade com os objetivos estabelecidos (ABNT NBR ISO 14044, 2014).

A ACV serve como base para decisões relacionadas à preferência por determinadas matérias-primas e substâncias auxiliares. Ao adotar essa abordagem, empresas estão promovendo uma gestão mais eficiente dos recursos naturais e contribuindo para a redução de impactos ambientais.

2.5 Cálculo de Emissões

O princípio fundamental da pegada de carbono, apesar das variações nos padrões, permanece constante: a quantidade de material ou atividade é multiplicada pelo respectivo fator de emissão (Equação 2.2). Os fatores de emissão são indicadores da quantidade de gases de efeito estufa (GEE) liberada por unidade de produção de um material ou processo. Esses valores podem variar conforme diversas características, como os insumos empregados, a distância entre a matéria-prima e o local de produção, além das tecnologias utilizadas (Zhang; Wang, 2016)..

$$\text{Pegada de Carbono} = \sum_{i=1}^n A_i \cdot FE_i \quad (2.2)$$

Nessa equação, n representa o número de tipos de materiais ou atividades considerados, A_i corresponde à quantidade do material ou da atividade do tipo i , e FE_i refere-se ao fator de emissão associado ao respectivo material ou atividade. Para o cálculo de emissões específicas, a equação pode ser ajustada conforme a situação ou atividade analisada, sendo recomendada a utilização de bancos de dados de fatores de emissão específicos, estabelecidos por normas e metodologias reconhecidas.

Do ponto de vista dimensional, destaca-se que apenas o parâmetro n é adimensional,

uma vez que se trata de um índice de contagem. As grandezas A_i e FE_i possuem unidades físicas definidas e não são adimensionais. O termo A_i é expresso em unidades compatíveis com a natureza do material ou da atividade analisada, tais como toneladas (t), metros cúbicos (m^3), litros (L) ou unidades de energia (kWh ou MWh). O fator de emissão FE_i , por sua vez, é expresso em unidades de massa de dióxido de carbono equivalente por unidade física do material ou da atividade, como tCO_2/t , tCO_2/m^3 , tCO_2/L ou tCO_2/MWh . Conforme o estudo de Mazzutti (2023) o cálculo da pegada de carbono é baseado na multiplicação da quantidade de insumos pelo respectivo fator de emissão (Tabela 1).

Tabela 1 — Exemplo de cálculo da pegada de carbono em fundações

Material/Atividade	Quantidade (A)	Fator de Emissão (FE)	Emissão ($A \times FE$)
Concreto	100 m^3	0,241 tCO_2e/m^3	24,10 tCO_2e
Aço	10.000 kg	1,37 tCO_2e/t	13,70 tCO_2e
Óleo Diesel	500 L	2,68 $kgCO_2e/L$	1,34 tCO_2e
Total estimado	—	—	39,26 tCO_2e

Fonte: Mazzutti,2023.

2.6 Emissores de GEE em Fundações e seus Fatores de Emissão

As fundações representam uma etapa essencial na construção civil, garantindo a estabilidade estrutural de edificações. No entanto, seu impacto ambiental é significativo, especialmente pela emissão de gases de efeito estufa (GEE), decorrente do uso intensivo de materiais como concreto e aço (Wang *et al.*, 2024). Estes materiais possuem altos fatores de emissão ao longo de seu ciclo de vida, abrangendo desde a extração da matéria-prima até o transporte e a fabricação. A indústria do cimento, componente principal do concreto, na sua produção é responsável por cerca de 7% a 8% das emissões globais de CO_2 , tornando-se um grande contribuinte para as mudanças climáticas (Barbhuiya; Das; Adak, 2024).

Os bancos de dados de fatores de emissão mais utilizados no contexto mundial incluem ferramentas de referência como Ecoinvent, GaBi e o Inventory of Carbon & Energy da University of Bath (Campolina *et al.*, 2015) . No Brasil, ainda não existe um banco de dados nacional padronizado para construção civil. O Guia Metodológico para Inventários de Emissões de Gases de Efeito Estufa na Construção Civil, desenvolvido pelo SindusCon-SP, foi adotado como referência metodológica neste estudo, pois apresenta dados de fatores de emissão considerando todos os GEE, desenvolvidos a partir de informações fornecidas por empresas brasileiras (Sinduscon, 2022). Porém na falta desses dados é utilizado o banco Europeu da

Universidade de Bath construído por Hammond e Jones, uma vez que é um banco amplo, gratuito e reconhecido internacionalmente (Hammond; Jones, 2011).

O Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) lançou uma iniciativa para descarbonizar o setor até 2029, com o objetivo de alcançar a neutralidade de carbono até 2050. Com financiamento de US\$ 10 milhões do Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF), o projeto visa fortalecer a infraestrutura regulatória e tecnológica, promover a capacitação profissional e incentivar o uso de tecnologias de baixo carbono. Essas medidas são fundamentais para a integração do Brasil nas metas globais de mitigação climática estabelecidas na Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) (MCTI, 2023). Por fim, é imprescindível considerar fatores locais que influenciam as emissões, como a distância de transporte dos materiais e as tecnologias empregadas na fabricação, o fator de emissão desses materiais pode variar significativamente, no processo de fabricação, essas variáveis podem alterar o impacto ambiental (Costa, 2012).

2.7 Pegada de Carbono de Fundações

Estudos recentes mostram que tanto as emissões podem variar bastante durante a construção de fundações, dependendo do tipo de fundação e das tecnologias utilizadas. As emissões diretas relacionadas ao uso de equipamentos durante a construção de fundações correspondem a 12,7%, enquanto o transporte de equipamentos representa 13,4% das emissões (Sandanayake *et al.*, 2017). Esses dados evidenciam a necessidade de uma análise detalhada dos fatores de emissão em cada etapa do processo construtivo.

Pesquisas realizadas sobre a análise comparativa de três edificações com diferentes tipos de fundações, duas com estacas e uma com radier estaqueado, estimaram as emissões de carbono associadas à fabricação de materiais, o qual representaram de 80% a 90% (Sandanayake *et al.*, 2016a). Outros estudos reforçam essa perspectiva ao constatar que as emissões incorporadas aos materiais representam 77,1% de GEE na construção de fundações, com o uso e o transporte de equipamentos contribuindo com 13,5% e 9,4%, respectivamente (Sandanayake *et al.*, 2016b).

Análises comparam estacas moldadas in loco e pré-moldadas, mostrando que, embora a redução no uso de equipamentos para estacas pré-moldadas diminua as emissões em 14,75%, há um aumento no impacto relacionado ao transporte (17,35%) (Luo; Sandanayake; Zhang, 2019). Uma avaliação revela que as fundações parcialmente ou totalmente pré-fabricadas podem reduzir as emissões de GEE em até 44% comparadas às fundações moldadas no local, especialmente

quando se considera o teste de carga dinâmica (Pujadas-Gispert *et al.*, 2020). A diferença nas emissões ocorre porque fundações moldadas *in loco* frequentemente exigem estacas de reação em concreto e aço para a realização dos ensaios de carga, aumentando o consumo de materiais e as emissões associadas, enquanto soluções pré-moldadas reduzem ou eliminam essa necessidade.

2.8 Neutralização de Carbono

A neutralização de carbono configura-se como uma estratégia essencial no contexto das políticas globais de mitigação das mudanças climáticas, buscando equilibrar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) decorrentes de atividades humanas (Khaffaf; Tamimi; Ahmed, 2024). O conceito foi impulsionado a partir do Protocolo de Quioto, assinado em 1997, na cidade de Quioto, no Japão, marco histórico na criação dos mecanismos de mercado de carbono (Asadnabizadeh e Moe, 2024). Tais mecanismos permitiram que países industrializados compensassem parte de suas emissões por meio de projetos certificados de redução de GEE, denominados Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL). Esse movimento inaugurou uma abordagem estruturada de compensação ambiental, possibilitando investimentos em projetos de reflorestamento, energias renováveis e eficiência energética como instrumentos de mitigação do aquecimento global (Fernandes; Leite, 2021).

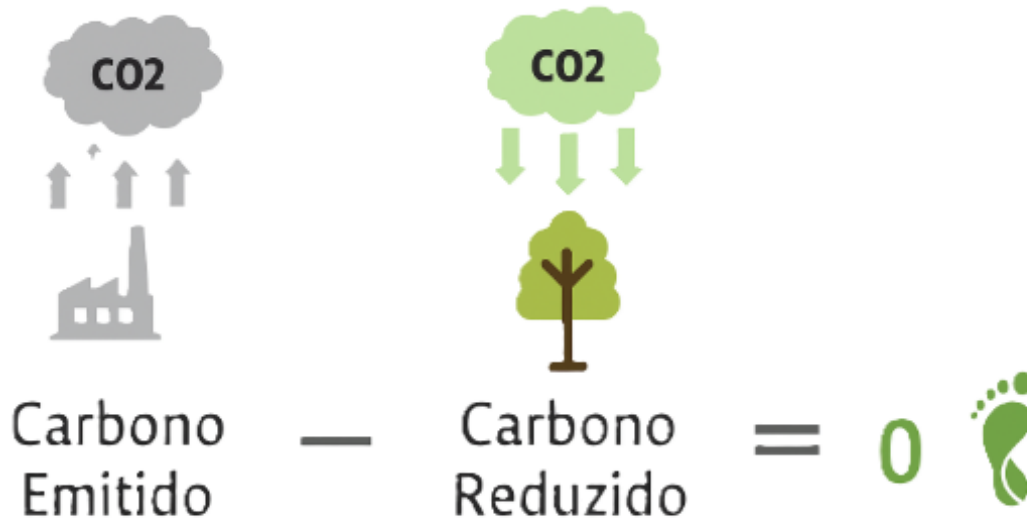
A partir da década de 2000, com o fortalecimento da agenda climática internacional, a neutralização de carbono consolidou-se como um instrumento global de sustentabilidade, expandindo-se gradualmente para empresas e indivíduos, que passaram a incorporar práticas de compensação de emissões em suas estratégias socioambientais (Chen *et al.*, 2022).

A neutralização de carbono (Figura 10) é uma estratégia para mitigar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) geradas ao longo do ciclo de vida, no setor da construção civil, essa prática envolve a compensação das emissões de CO₂ por meio de iniciativas que capturam ou evitam a liberação de carbono na atmosfera, promovendo a sustentabilidade ambiental das edificações (Laera, 2011).

Entre as principais medidas de neutralização, destacam-se o uso de materiais de baixo carbono, como cimentos ecológicos, e a implementação de tecnologias inovadoras no processo construtivo, que reduzam o consumo de energia e minimizem o uso de combustíveis fósseis. A adoção de técnicas de construção modular e a utilização de elementos pré-fabricados também têm sido apontadas como soluções eficazes, pois, além de reduzir o desperdício de materiais, diminuem a necessidade de transporte e, conseqüentemente, as emissões associadas.

A compensação de emissões por meio de créditos de carbono é outra estratégia amplamente adotada. As empresas do setor podem investir em projetos de reflorestamento, energia renovável ou eficiência energética, gerando créditos que neutralizam o impacto ambiental das obras (Gao *et al.*, 2025). A neutralização de carbono é uma estratégia amplamente utilizada para compensar as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Um dos métodos mais eficazes e naturais para essa compensação é o plantio de árvores, que sequestram dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera durante o processo de fotossíntese, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas (Santos; Armani; Moreira, 2024).

Figura 10 — Conceito de neutralidade de carbono.



Fonte: Adaptado de Khaffaf *et al.* (2025).

2.8.1 Etapas da Neutralização de Carbono

A neutralização de carbono tem como etapa inicial a redução das emissões diretas de gases de efeito estufa (GEE), por meio da adoção de práticas preventivas e soluções tecnológicas. Entre as principais estratégias, destaca-se a eletrificação de processos produtivos, capaz de reduzir as emissões em até 30%, sobretudo em setores industriais com alto consumo de combustíveis fósseis (Li *et al.*, 2024).

A transição para fontes de energia renováveis também é responsável por reduções médias que variam entre 40% e 70%, a depender da matriz energética substituída (Szetela *et al.*, 2022). O incremento da eficiência energética pode representar uma queda de até 25% nas emissões totais, principalmente em edificações e processos produtivos, enquanto a otimização

das cadeias industriais contribui com uma diminuição estimada entre 10% e 20% das emissões associadas ao transporte, à produção e à distribuição (Sundaramoorthy *et al.*, 2023). Segundo He *et al.*, da *Shanghai University*, a conjugação entre a contabilidade da pegada de carbono e a adoção de tecnologias limpas é estruturante para a mitigação das emissões em escala global, alcançando reduções estimadas entre 30% e 50%, conforme evidenciado por estudos associados.

Após a implementação de medidas de redução de carbono podem ser compensadas por meio da aquisição de créditos de carbono, cada um equivalente a uma tonelada de CO₂ evitada ou removida da atmosfera (Huber; Bach; Finkbeiner, 2024). Essa estratégia viabiliza o cumprimento de metas de neutralização e tem como referência histórica o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), criado pelo Protocolo de Quioto (1997), que permite a países industrializados financiar projetos sustentáveis em nações em desenvolvimento e receber Reduções Certificadas de Emissões (CERs) (West *et al.*, 2023). No âmbito dos mercados voluntários, o Gold Standard, criado em 2003 e expandido em 2006, reforça a integridade dos créditos ao exigir adicionalidade, baixa taxa de vazamento (*leakage*) e contribuição efetiva ao desenvolvimento sustentável, assegurando que os projetos tenham impacto ambiental e social mensurável (Gieseckam, 2016).

2.8.2 Cálculo da Neutralização de Carbono

A neutralização começa com a determinação da pegada de carbono total gerada por um projeto ou atividade. A pegada de carbono é expressa em toneladas de CO₂ equivalente (tCO₂e), considerando todas as fases do ciclo de vida, desde a produção de materiais até a construção e operação. A fórmula básica para determinar a quantidade de carbono que precisa ser neutralizada é:

$$C_{\text{neutralizar}} = E_{\text{total}} \quad (2.3)$$

Onde $C_{\text{neutralizar}}$ representa a quantidade de carbono a ser neutralizada (em tCO₂e), e E_{total} corresponde às emissões totais geradas pelo projeto.

A estimativa do número de árvores necessárias para a neutralização das emissões baseia-se na capacidade média de sequestro de carbono da vegetação adotada. De acordo com estudo realizado pelo Instituto Totum em parceria com a Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP) e a Fundação SOS Mata Atlântica (2013), uma árvore nativa da

Mata Atlântica é capaz de remover, em média, 163,14 kg de CO₂ equivalente ao longo dos seus primeiros 20 anos de crescimento, o que corresponde a uma taxa média anual aproximada de 8,16 kg de CO₂ por árvore. Com base nesse valor médio de sequestro, o número de árvores necessárias para compensação das emissões pode ser estimado conforme a Equação (2.3)

Com base nesse valor, o número de árvores necessárias para neutralizar as emissões pode ser estimado por meio da seguinte equação:

$$N_{\text{árvores}} = \frac{C_{\text{neutralizar}}}{S_{\text{média}}} \quad (2.4)$$

Onde $N_{\text{árvores}}$ representa o número de árvores necessárias, $S_{\text{média}}$ corresponde à média de sequestro de carbono por árvore por ano (em kg CO₂), e $C_{\text{neutralizar}}$ é a quantidade de carbono a ser neutralizada.

2.9 Fundamentos Computacionais da Ferramenta de Cálculo de Carbono

2.9.1 Python e o Desenvolvimento de Soluções Técnicas

Python é uma linguagem de programação interpretada, multiparadigma, de tipagem dinâmica e fortemente ligada à comunidade científica e acadêmica. Sua sintaxe simplificada, combinada à legibilidade e à capacidade de abstração, favorece a adoção tanto por iniciantes quanto por pesquisadores em áreas aplicadas que demandam desenvolvimento rápido de soluções técnicas (Cavalcante; Oliveira, 2022).

Nas últimas décadas, a linguagem Python tem apresentado uma expansão significativa em seu uso no meio acadêmico e técnico-científico, especialmente em áreas voltadas ao meio ambiente, geotecnologias, modelagem computacional e simulações de sistemas complexos. Esse crescimento está relacionado à consolidação de um ecossistema de bibliotecas científicas, à forte documentação disponível e à sua integração com ferramentas estatísticas, visuais e de análise de dados. Tais características tornam Python particularmente compatível com as diretrizes da ciência aberta, que demandam reprodutibilidade, transparência e interoperabilidade entre plataformas computacionais (Guo, 2021).

Entre as características que contribuem para a ampla adoção de Python em projetos ambientais estão a capacidade de interagir com diversos formatos de dados (como planilhas, arquivos estruturados e sensores), a compatibilidade com bibliotecas científicas de alto desempenho e a possibilidade de empacotamento de scripts em aplicações portáteis. A linguagem

também é amplamente utilizada em análises relacionadas a emissões atmosféricas, inventários de carbono, mapeamentos climáticos e gestão de recursos naturais, em virtude de sua flexibilidade para integrar dados técnicos com representações gráficas e geoespaciais.

A estrutura modular da linguagem, baseada em pacotes e bibliotecas reutilizáveis, permite a organização do código de forma escalável. Isso facilita a manutenção e a expansão de projetos, tornando Python uma alternativa eficiente tanto para prototipagem quanto para a produção de soluções robustas em ambientes técnicos e acadêmicos.

2.9.2 Interface Gráfica com Tkinter: Estrutura e Interação

Interfaces gráficas de usuário (GUI, do inglês *Graphical User Interface*) são componentes essenciais em sistemas interativos, pois permitem que usuários operem softwares sem a necessidade de utilizar comandos em linha de texto. A interação é realizada por meio de elementos visuais como botões, menus e campos de entrada, que estabelecem uma camada intuitiva entre o ser humano e o sistema computacional. Essa abordagem favorece o uso da aplicação por pessoas com diferentes níveis de familiaridade com programação ou estruturas algorítmicas (Shabani, 2023).

No ecossistema Python, a biblioteca *Tkinter* destaca-se como uma opção acessível e amplamente documentada para o desenvolvimento de interfaces gráficas. Por ser integrada à distribuição padrão da linguagem, seu uso não exige instalações adicionais, o que facilita o desenvolvimento de aplicações portáteis e autônomas. A biblioteca adota um modelo de programação orientado a eventos, em que cada ação do usuário, como clicar em um botão ou preencher um campo, é associada a uma função que será executada em resposta àquela interação (Moore, 2021).

2.9.2.1 Elementos de Interface: Entradas, Botões e Layouts

A construção de uma interface gráfica com *Tkinter* envolve a definição de diversos elementos interativos, chamados de widgets. Entre os mais utilizados estão os campos de entrada (*Entry*), que permitem a coleta de valores inseridos pelo usuário; os botões (*Button*), responsáveis por disparar ações internas do sistema; e os rótulos (*Label*), que exibem textos informativos ou resultados dinâmicos. Esses elementos são organizados por meio de gerenciadores de layout, que controlam sua posição e alinhamento na janela da aplicação (Mawlood-Yunis, 2022).

O gerenciador *grid* é frequentemente empregado por sua capacidade de estruturar

a interface em linhas e colunas, o que facilita a organização de formulários, tabelas e áreas agrupadas por função. Já o método Pack dispõe os widgets de forma sequencial, sendo útil em estruturas mais simples. O Place, por sua vez, permite controle absoluto da posição dos elementos, embora com menor flexibilidade responsiva (Satria *et al.*, 2022).

Cada widget pode ser configurado com parâmetros visuais como cor, tamanho da fonte, alinhamento e espaçamento, o que permite personalização conforme critérios de identidade visual, legibilidade ou foco funcional. Também é possível associar variáveis de controle que monitoram automaticamente os valores inseridos ou modificados na interface.

2.9.2.2 *Papel da Interface Gráfica na Acessibilidade de Ferramentas Técnicas*

Interfaces gráficas desempenham papel relevante na ampliação da acessibilidade de sistemas computacionais. Ao substituir a necessidade de entrada textual por comandos visuais, a GUI reduz a barreira de entrada para usuários que não dominam programação, favorecendo a adoção da ferramenta em contextos técnicos, administrativos ou operacionais. Elementos visuais como menus suspensos, caixas de seleção e mensagens de validação orientam o usuário durante o uso, promovendo maior autonomia e confiabilidade nas interações com o sistema (Li; Tigwell; Shinohara, 2021).

O uso de recursos como mensagens de erro contextualizadas, formatação condicional de campos e realimentação visual imediata contribui para a redução de erros de operação e melhora a compreensão do funcionamento interno da aplicação. Essa mediação gráfica entre a lógica do programa e a ação do usuário permite que ferramentas computacionais sejam utilizadas em ambientes interdisciplinares, mesmo por usuários sem formação em computação (Hamidli, 2023).

Outro aspecto importante é a aplicação de princípios de design inclusivo no desenvolvimento da interface. O uso de paletas de cores acessíveis, tamanhos ajustáveis de fonte e elementos com contraste adequado contribui para que o sistema seja compatível com diferentes perfis de usuário, incluindo pessoas com limitações visuais ou motoras. A aplicação consistente dessas diretrizes aumenta o potencial de aplicação da ferramenta em ambientes institucionais diversos, ampliando seu alcance e funcionalidade (Sulianta, 2025).

2.9.3 Estruturas de Dados e Lógica Computacional

A construção de sistemas computacionais orientados ao processamento técnico de informações requer o uso de estruturas de dados que sejam eficientes, flexíveis e adequadas ao tipo de operação envolvida. Em linguagens de alto nível como Python, a organização e manipulação de dados ocorrem por meio de estruturas nativas como listas, tuplas, dicionários e objetos, bem como através de bibliotecas específicas voltadas à manipulação de dados tabulares ou numéricos (Buriol, 2023).

A lógica computacional, por sua vez, estrutura o caminho percorrido pelos dados desde sua entrada até a produção do resultado final. Esse fluxo é composto por etapas como a leitura de dados, a validação de entradas, o mapeamento de parâmetros, o cálculo de saídas e a formatação dos resultados. A clareza na definição dessas etapas, aliada ao uso de estruturas adequadas, contribui para a manutenção, reprodutibilidade e robustez do sistema desenvolvido (Shimasaki; Prado, 2021).

2.9.3.1 Dicionários como Base para Armazenamento dos Fatores de Emissão

Entre as estruturas nativas da linguagem Python, o dicionário (`dict`) destaca-se por permitir o armazenamento de pares `chave:valor`, facilitando o acesso direto a elementos por meio de uma chave identificadora. Essa característica o torna particularmente adequado para representar dados associativos, como é o caso de catálogos de materiais e seus respectivos fatores de emissão (Leite, 2023).

Ao utilizar dicionários, é possível construir uma base de dados leve e de acesso rápido, em que cada chave representa um material ou insumo e seu valor associado corresponde ao fator de emissão de CO₂ equivalente. A estrutura permite tanto consultas diretas quanto atualizações dinâmicas, sem a necessidade de percorrer toda a base linearmente, como ocorreria em listas convencionais (Lafore; Broder; Canning, 2022).

Essa abordagem favorece também a organização dos dados em múltiplos níveis, como por categorias ou subgrupos, por meio de dicionários aninhados (*nested dictionaries*), permitindo representar estruturas hierárquicas sem perda de eficiência computacional.

2.9.3.2 Integração com Pandas para Manipulação e Exportação

Para tarefas que envolvem a manipulação estruturada de dados, como filtragem, agregação, ordenação ou exportação, a biblioteca *pandas* oferece ferramentas amplamente utilizadas em ambientes científicos e técnicos. Sua principal estrutura, o *DataFrame*, permite representar dados em formato tabular, com suporte a operações vetorizadas e integração com arquivos em formatos diversos (Gupta; Bagchi, 2024).

A conversão de dados armazenados em dicionários para *DataFrames* permite aplicar operações analíticas de forma mais eficiente, além de facilitar a exportação dos resultados para planilhas compatíveis com softwares corporativos. Essa integração amplia a capacidade de análise e documentação dos resultados gerados pelo sistema, especialmente quando há necessidade de apresentar os dados em relatórios técnicos ou sistemas externos (Keller, 2024).

A biblioteca também possibilita a formatação condicional de colunas, o cálculo de estatísticas descritivas e a junção com outras tabelas, o que torna o *pandas* uma ferramenta central na fase de organização e saída dos dados tratados computacionalmente.

2.9.3.3 Fluxo Computacional: Entrada → Processamento → Saída

A organização lógica de um sistema computacional é tradicionalmente estruturada em três etapas principais: entrada, processamento e saída. A fase de entrada refere-se à coleta de dados brutos, que podem ser inseridos pelo usuário via interface gráfica, carregados de arquivos ou provenientes de sensores e bancos de dados. Essa etapa envolve, ainda, a validação de formatos, o tratamento de valores ausentes e a conversão de unidades, quando necessário (Tanenbaum; Bos, 2024).

No processamento, os dados são transformados com base nas regras estabelecidas pela lógica do programa. Isso pode incluir cálculos, transformações matemáticas, cruzamentos com tabelas de referência ou aplicação de filtros. A clareza nessa etapa é fundamental para assegurar a transparência e a rastreabilidade dos resultados (Tanenbaum; Bos, 2024).

Por fim, a etapa de saída compreende a apresentação dos resultados em formatos compreensíveis ao usuário. Isso pode envolver a exibição direta na interface gráfica, a geração de gráficos e tabelas ou a exportação dos dados processados para arquivos externos. A definição clara e modular dessas etapas permite que o sistema seja escalável e adaptável a diferentes contextos de uso (Tanenbaum; Bos, 2024).

A organização desse fluxo em blocos bem definidos contribui ainda para a modularização do código, permitindo que partes específicas do sistema possam ser testadas, ajustadas ou substituídas sem comprometer o funcionamento global da ferramenta. Esse princípio é fundamental no desenvolvimento de aplicações científicas e técnicas, pois favorece a manutenção do sistema ao longo do tempo, a incorporação de novos recursos e a adaptação a diferentes conjuntos de dados ou contextos de uso.

2.9.4 Visualização de Dados com Matplotlib

A visualização de dados é uma etapa fundamental no ciclo de análise computacional, especialmente em sistemas voltados à síntese de informações técnicas e ambientais. Representações visuais adequadas permitem compreender rapidamente padrões, variações e discrepâncias nos dados analisados, facilitando a comunicação dos resultados tanto para especialistas quanto para usuários não técnicos. No ecossistema Python, a biblioteca *matplotlib* oferece suporte à geração de gráficos estáticos e customizáveis, com controle detalhado sobre eixos, escalas, cores e rótulos. Desenvolvida para atender à comunidade científica, sua interface flexível permite representar diferentes tipos de dados e contextos analíticos de forma clara e estruturada (Teoh; Rong, 2022).

2.9.4.1 Geração de Gráficos Técnicos: Barras e Pizza

Entre os tipos de visualização comumente empregados em aplicações técnico-ambientais, os gráficos de barras (*bar plots*) e de setores (*pie charts*) são frequentemente utilizados para representar a contribuição relativa de diferentes categorias em um total agregado. No caso de estimativas de emissões de carbono, esses gráficos facilitam a identificação de quais materiais, processos ou categorias têm maior impacto no inventário total (Wang *et al.*, 2024).

A biblioteca *matplotlib* permite controlar características como espessura das barras, rótulos dos eixos, paletas de cores e ordenamento das categorias, o que contribui para uma representação visual coerente com a natureza dos dados. Gráficos de pizza são úteis em situações em que se deseja destacar proporções relativas de um conjunto fixo de elementos, especialmente quando o objetivo é ilustrar o peso percentual de determinados itens em relação ao total emitido. Em ambas as representações, é possível incluir anotações, legendas e rótulos informativos, adaptando a apresentação visual ao perfil da audiência (Shreemathi *et al.*, 2024).

2.9.4.2 Interpretação Visual para Tomada de Decisão

Representações gráficas orientam a análise e a tomada de decisão, especialmente quando os dados precisam ser compreendidos por públicos diversos. Gráficos bem estruturados reduzem a ambiguidade da análise numérica bruta e possibilitam comparações mais rápidas entre categorias ou cenários (Fischer; Smiesko; Sellner, 2021). Em contextos onde há grande discrepância entre valores, como na comparação entre materiais de alta e baixa emissão de CO₂, o uso de escalas logarítmicas pode revelar padrões que seriam ocultados por uma escala linear. A biblioteca *matplotlib* oferece suporte a esse tipo de transformação, o que contribui para a acurácia visual dos resultados e reforça a legibilidade de gráficos compostos por dados com ordens de magnitude distintas.

2.9.5 Exportação dos Resultados: Organização e Compartilhamento

A exportação dos resultados é uma etapa essencial para o arquivamento, a análise posterior e o compartilhamento de informações produzidas por sistemas computacionais. Em contextos técnicos e institucionais, a possibilidade de gerar arquivos em formatos amplamente aceitos permite que os dados processados sejam reaproveitados por diferentes setores, integrando-se a planilhas de controle, relatórios corporativos ou plataformas de monitoramento ambiental. A estruturação clara dos dados exportados também favorece sua rastreabilidade e posterior utilização por terceiros, reforçando a transparência e a reprodutibilidade dos resultados.

2.9.5.1 Geração de Planilhas no Formato Excel (.xlsx)

O formato Excel (.xlsx) é amplamente utilizado em ambientes corporativos, acadêmicos e técnicos, sendo considerado padrão de fato para o compartilhamento de dados estruturados. A biblioteca *pandas*, em conjunto com bibliotecas auxiliares como *openpyxl*, permite exportar dados diretamente de DataFrames para planilhas compatíveis com esse formato, mantendo colunas nomeadas, unidades de medida e categorias bem definidas (Lindquist; Sulewski, 2024).

A exportação para Excel permite não apenas a preservação dos valores calculados, mas também a organização dos dados em abas específicas, a inclusão de totais, médias ou observações adicionais, e a personalização de formatos numéricos. Essas características são especialmente úteis quando o objetivo é incorporar os resultados da ferramenta em relatórios

técnicos mais amplos ou em documentos institucionais.

2.9.5.2 Compatibilidade com Softwares de Escritório e Planilhas Corporativas

Ao adotar formatos amplamente reconhecidos como o `.xlsx`, a ferramenta garante compatibilidade com uma variedade de softwares de escritório, incluindo Microsoft Excel, Google Sheets, LibreOffice Calc e plataformas de ERP que permitem importações automatizadas. Essa compatibilidade amplia a utilidade prática da ferramenta, permitindo que os dados gerados possam ser facilmente integrados a rotinas administrativas, processos de prestação de contas ou sistemas de gestão ambiental (Ragavan; Sarkar; Gordon, 2021) .

Essa escolha de formato também favorece a interoperabilidade entre setores que utilizam diferentes sistemas operacionais ou conjuntos de ferramentas, permitindo que os resultados sejam acessados, analisados e editados de maneira uniforme. Em contextos institucionais que exigem padronização documental, a adoção do Excel como formato de exportação contribui para a formalização dos resultados e sua incorporação a fluxos de trabalho existentes.

2.9.6 Distribuição da Ferramenta: Geração de Executável

Para que uma aplicação desenvolvida em Python possa ser utilizada por usuários finais sem necessidade de configurar ambientes de desenvolvimento ou instalar dependências adicionais, é comum adotar processos de empacotamento que geram um arquivo executável independente. Essa abordagem simplifica a distribuição da ferramenta, tornando-a acessível mesmo para usuários que não possuem familiaridade com linguagens de programação ou sistemas de terminal. Além de permitir a execução autônoma da aplicação, esse modelo facilita sua implantação em ambientes institucionais, nos quais a instalação de pacotes externos pode ser restringida por políticas internas de segurança ou gestão de TI.

2.9.6.1 Conceito de Empacotamento e Executáveis Portáteis

Empacotar um sistema consiste em reunir todos os seus componentes essenciais: código-fonte, bibliotecas, dependências, arquivos de interface e outros recursos, em um único conjunto executável. Em ambientes de sistemas operacionais como Windows, isso resulta em um arquivo do tipo `.exe`, que pode ser executado de forma autônoma, sem requerer configurações adicionais (D'Hondt; Ouytsel; Legay, 2023).

O empacotamento facilita o compartilhamento da ferramenta com diferentes usuários, garantindo que todos tenham acesso à mesma versão funcional, com comportamento previsível. Essa estratégia também contribui para a preservação da integridade do sistema, pois reduz o risco de incompatibilidades entre versões de bibliotecas ou ambientes divergentes.

2.9.6.2 *Ferramentas Utilizadas na Conversão: pyinstaller e suas limitações*

Uma das ferramentas mais utilizadas para gerar executáveis a partir de scripts Python é o `pyinstaller`. Essa biblioteca realiza a análise do código e de suas dependências, embutindo os arquivos necessários no executável final. O processo é realizado por meio de linha de comando e permite a inclusão de arquivos auxiliares, como ícones, imagens e arquivos de dados, que são utilizados pela aplicação no momento da execução (Frota; Ruver; Figueiredo, 2024).

Embora funcional, o `pyinstaller` possui limitações importantes. Em alguns casos, bibliotecas com estruturas internas complexas podem não ser corretamente empacotadas, exigindo configurações adicionais no arquivo de especificação (`.spec`). Também é comum que o executável gerado apresente um tamanho significativamente maior do que o script original, devido à incorporação de todas as dependências. Além disso, a portabilidade entre sistemas operacionais é restrita: um executável gerado no Windows, por exemplo, não será compatível com Linux ou macOS, sendo necessário gerar versões distintas para cada ambiente.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais e os métodos adotados para a avaliação das emissões e da neutralização de carbono associadas à execução de fundações profundas do tipo estaca raiz e estaca hélice contínua, considerando obras realizadas na cidade de Fortaleza. A metodologia foi estruturada com base na ACV e em protocolos reconhecidos para a quantificação de gases de efeito estufa, como o GHG Protocol, a ISO 14064 e a PAS 2080, contemplando o levantamento de dados, a estruturação da base de informações, a definição dos procedimentos de cálculo das emissões, o uso de ferramenta computacional como suporte metodológico, a aplicação e validação dos resultados com dados de obras reais, a análise dos resultados obtidos, a delimitação das etapas do processo construtivo consideradas e a identificação das limitações do estudo.

3.1 Campo de Estudo da Pesquisa

O campo de estudo desta pesquisa compreende duas obras de fundações profundas executadas na cidade de Fortaleza-CE, selecionadas por representarem tipologias amplamente utilizadas na construção civil brasileira: estaca raiz e estaca hélice contínua. As obras analisadas forneceram dados reais de projetos executivos e de parâmetros construtivos, permitindo a caracterização dos sistemas de fundação e a análise das emissões de carbono associadas aos seus respectivos processos executivos. A escolha dessas obras possibilitou a comparação entre diferentes soluções técnicas de fundações profundas, considerando condições reais de implantação, dimensões geométricas das estacas e práticas construtivas adotadas.

A primeira obra analisada corresponde a um empreendimento localizado em Fortaleza-CE, executado com fundações profundas do tipo estaca raiz. O empreendimento consiste em um edifício com área total construída de 25.970 m², composto por 46 pavimentos e aproximadamente 171 m de altura. O sistema de fundação é constituído por 224 estacas raiz, com diâmetros aproximados de 0,40 m e profundidades variando entre 24 m e 25 m, características que influenciam diretamente o volume de materiais empregados e, conseqüentemente, as emissões de dióxido de carbono equivalente associadas à sua execução.

A segunda obra analisada refere-se a um empreendimento também localizado em Fortaleza-CE, cuja solução de fundação adotada foi a estaca hélice contínua. O edifício possui área total construída de 12.516,37 m² e é composto por uma torre com 16 pavimentos. O sistema

de fundação é formado por 165 estacas hélice contínua, sendo 82 estacas com diâmetro nominal de 400 mm e 83 estacas com diâmetro de 500 mm, com profundidades médias variando entre aproximadamente 11 m e 14 m. Essas características geométricas e construtivas serviram de base para a análise comparativa das emissões de carbono associadas à execução das fundações estudadas.

3.2 Levantamento de Dados

Este passo consistiu em uma pesquisa bibliográfica e documental para identificar os fatores de emissão de carbono relacionados aos materiais e processos empregados na execução de fundações profundas. Foram incluídos materiais de construção, combustíveis utilizados no transporte e operação de maquinário pesado, bem como outros insumos relevantes. Para garantir valores acurados e confiáveis, a pesquisa se baseou em fontes reconhecidas, como artigos científicos e bases de dados internacionais.

Os materiais e processos foram categorizados em quatro grupos principais:

- **Materiais Nacionais:** Materiais produzidos e adquiridos localmente, com fatores de emissão específicos para cada tipo.
- **Materiais Internacionais:** Materiais importados, considerando as emissões associadas ao transporte de longa distância.
- **Materiais de Transporte Nacional:** Combustíveis e insumos associados ao transporte dentro do território nacional.
- **Materiais de Transporte Internacional:** Combustíveis e insumos associados ao transporte internacional de materiais.

3.3 Estruturação da Base de Dados

Esta etapa desta pesquisa foi focada na definição detalhada dos processos executivos de fundações profundas, com especial atenção às estacas raiz e estacas hélice contínua. A partir dessa delimitação, foram identificados os materiais e equipamentos típicos utilizados em cada fase, além dos processos de transporte necessários para a execução dessas fundações.

A seleção dos materiais seguiu parâmetros amplamente discutidos na literatura científica, o que garantiu uma base sólida para a análise dos impactos ambientais. Com isso, foi possível compilar uma base de dados contendo os fatores de emissão de carbono específicos,

contribuindo para uma avaliação mais acurada da pegada de carbono de tais obras. Os dados das Tabelas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 correspondem aos principais materiais utilizados em obras de fundações de profundas em âmbito nacional.

Tabela 2 — Fatores de emissão de materiais metálicos

Materiais	Emissão (tCO₂/t)	Fonte
Barras de aço	1,845200	Costa (2012)
Seções de aço	1,845200	Costa (2012)
Arames	1,845200	Costa (2012)

Fonte: Autora (2025).

Tabela 3 — Fatores de emissão de concretos CP II E 40

Materiais	Emissão (tCO₂/t)	Fonte
Concreto - CP II E 40 - 20 MPa	0,074583	Vieira <i>et al.</i> (2022)
Concreto - CP II E 40 - 25 MPa	0,081250	Vieira <i>et al.</i> (2022)
Concreto - CP II E 40 - 30 MPa	0,088333	Vieira <i>et al.</i> (2022)
Concreto - CP II E 40 - 35 MPa	0,095833	Vieira <i>et al.</i> (2022)
Concreto - CP II E 40 - 40 MPa	0,103750	Vieira <i>et al.</i> (2022)

Fonte: Autora (2025).

Tabela 4 — Fatores de emissão de concretos com reutilização

Materiais	Emissão (tCO₂/t)	Fonte
Concreto - Reutilização R - 20 MPa	0,072083	(VIEIRA <i>et al.</i> , 2022)
Concreto - Reutilização R - 25 MPa	0,080000	Vieira <i>et al.</i> (2022)
Concreto - Reutilização R - 30 MPa	0,087917	Vieira <i>et al.</i> (2022)
Concreto - Reutilização R - 35 MPa	0,096667	Vieira <i>et al.</i> (2022)
Concreto - Reutilização R - 40 MPa	0,105417	Vieira <i>et al.</i> (2022)
Concreto - Reutilização C - 20 MPa	0,077917	Vieira <i>et al.</i> (2022)
Concreto - Reutilização C - 25 MPa	0,087917	Vieira <i>et al.</i> (2022)
Concreto - Reutilização C - 30 MPa	0,100000	Vieira <i>et al.</i> (2022)
Concreto - Reutilização C - 35 MPa	0,112500	Vieira <i>et al.</i> (2022)
Concreto - Reutilização C - 40 MPa	0,125417	Vieira <i>et al.</i> (2022)
Concreto - Reutilização HSA - 20 MPa	0,073333	Vieira <i>et al.</i> (2022)
Concreto - Reutilização HSA - 25 MPa	0,080833	Vieira <i>et al.</i> (2022)
Concreto - Reutilização HSA - 30 MPa	0,087500	Vieira <i>et al.</i> (2022)
Concreto - Reutilização HSA - 35 MPa	0,095000	Vieira <i>et al.</i> (2022)
Concreto - Reutilização HSA - 40 MPa	0,102500	Vieira <i>et al.</i> (2022)

Fonte: Autora (2025).

Tabela 5 — Fatores de emissão de concretos CP II-E-32 (CO)

Materiais	Emissão (tCO₂/t)	Fonte
Concreto 15 MPa - CP II-E-32 – CO	0,129167	Costa (2012)
Concreto 20 MPa - CP II-E-32 – CO	0,140833	Costa (2012)
Concreto 25 MPa - CP II-E-32 – CO	0,144167	Costa (2012)
Concreto 30 MPa - CP II-E-32 – CO	0,151250	Costa (2012)
Concreto 35 MPa - CP II-E-32 – CO	0,158750	Costa (2012)
Concreto 40 MPa - CP II-E-32 – CO	0,164583	Costa (2012)
Concreto 45 MPa - CP II-E-32 – CO	0,170417	Costa (2012)
Concreto 50 MPa - CP II-E-32 – CO	0,176667	Costa (2012)

Fonte: Autora (2025).

Tabela 6 — Fatores de emissão de concretos CP II-E-32 (CD)

Materiais	Emissão (tCO₂/t)	Fonte
Concreto 15 MPa - CP II-E-32 – CD	0,137083	Costa (2012)
Concreto 20 MPa - CP II-E-32 – CD	0,149167	Costa (2012)
Concreto 25 MPa - CP II-E-32 – CD	0,152500	Costa (2012)
Concreto 30 MPa - CP II-E-32 – CD	0,159583	Costa (2012)
Concreto 35 MPa - CP II-E-32 – CD	0,167083	Costa (2012)
Concreto 40 MPa - CP II-E-32 – CD	0,172917	Costa (2012)
Concreto 45 MPa - CP II-E-32 – CD	0,178750	Costa (2012)
Concreto 50 MPa - CP II-E-32 – CD	0,185417	Costa (2012)

Fonte: Autora (2025).

Tabela 7 — Fatores de emissão de concretos CP V-ARI

Materiais	Emissão (tCO₂/t)	Fonte
Concreto 15 MPa - CP V-ARI – CO	0,125417	Costa (2012)
Concreto 20 MPa - CP V-ARI – CO	0,136667	Costa (2012)
Concreto 25 MPa - CP V-ARI – CO	0,147083	Costa (2012)
Concreto 30 MPa - CP V-ARI – CO	0,155417	Costa (2012)
Concreto 35 MPa - CP V-ARI – CO	0,164583	Costa (2012)
Concreto 40 MPa - CP V-ARI – CO	0,173750	Costa (2012)
Concreto 45 MPa - CP V-ARI – CO	0,182500	Costa (2012)
Concreto 50 MPa - CP V-ARI – CO	0,193333	Costa (2012)
Concreto 15 MPa - CP V-ARI – CD	0,133750	Costa (2012)
Concreto 20 MPa - CP V-ARI – CD	0,144583	Costa (2012)
Concreto 25 MPa - CP V-ARI – CD	0,155417	Costa (2012)
Concreto 30 MPa - CP V-ARI – CD	0,163750	Costa (2012)
Concreto 35 MPa - CP V-ARI – CD	0,172917	Costa (2012)
Concreto 40 MPa - CP V-ARI – CD	0,182083	Costa (2012)
Concreto 45 MPa - CP V-ARI – CD	0,191250	Costa (2012)
Concreto 50 MPa - CP V-ARI – CD	0,202083	Costa (2012)

Fonte: Autora (2025).

Tabela 8 — Fatores de emissão de concretos CP II-F-32

Materiais	Emissão (tCO₂/t)	Fonte
Concreto 15 MPa - CP II-F-32 – CO	0,136667	Costa (2012)
Concreto 20 MPa - CP II-F-32 – CO	0,146250	Costa (2012)
Concreto 25 MPa - CP II-F-32 – CO	0,149583	Costa (2012)
Concreto 30 MPa - CP II-F-32 – CO	0,161250	Costa (2012)
Concreto 35 MPa - CP II-F-32 – CO	0,168333	Costa (2012)
Concreto 40 MPa - CP II-F-32 – CO	0,176667	Costa (2012)
Concreto 45 MPa - CP II-F-32 – CO	0,187917	Costa (2012)
Concreto 50 MPa - CP II-F-32 – CO	0,200000	Costa (2012)
Concreto 15 MPa - CP II-F-32 – CD	0,144583	Costa (2012)
Concreto 20 MPa - CP II-F-32 – CD	0,154167	Costa (2012)
Concreto 25 MPa - CP II-F-32 – CD	0,157083	Costa (2012)
Concreto 30 MPa - CP II-F-32 – CD	0,169583	Costa (2012)
Concreto 35 MPa - CP II-F-32 – CD	0,176667	Costa (2012)
Concreto 40 MPa - CP II-F-32 – CD	0,185417	Costa (2012)
Concreto 45 MPa - CP II-F-32 – CD	0,196250	Costa (2012)
Concreto 50 MPa - CP II-F-32 – CD	0,208750	Costa (2012)

Fonte: Autora (2025).

Tabela 9 — Fatores de emissão de argamassas e outros materiais

Materiais	Emissão (tCO₂/t)	Fonte
Argamassa (1:3)	0,208000	Silva (2006)
Argamassa (1:4)	0,171000	Silva (2006)
Argamassa (1:5)	0,146000	Silva (2006)
Argamassa (1:6)	0,127000	Silva (2006)
Argamassa (1:0,5:4,5)	0,200000	Silva (2006)
Argamassa (1:1:6)	0,163000	Silva (2006)
Argamassa (1:2:9)	0,145000	Silva (2006)
Tubo de concreto – CP	0,224000	Costa (2012)
Bloco de concreto – CP	0,184000	Costa (2012)
Tubo de Polietileno de Alta Densidade	1,420000	Brasken (2013)
Água	0,000200	SABESP (2018)
Cimento	0,04844	Lima <i>et al.</i> (2018)
Areia	0,02262	Lima <i>et al.</i> (2018)

Fonte: Autora (2025).

A base de dados foi estruturada para refletir os materiais envolvidos na construção de fundações profundas, com ênfase na estaca raiz e na estaca hélice contínua, que são comumente utilizadas em projetos de grande porte devido à sua resistência e versatilidade.

A decisão de dividir os dados em quatro tabelas distintas se baseou na necessidade de segmentar as informações de maneira clara, permitindo um acesso mais eficiente aos fatores de emissão associados a cada região (Nacional ou Internacional). Cada tabela representa uma categoria distinta de materiais ou região. Quando comparamos os fatores de emissão dos mesmos materiais no âmbito nacional e internacional, pode-se observar uma diferença significativa. Por

esse motivo, houve uma separação desses dados com o objetivo de um melhor entendimento do usuário que usaria a calculadora de emissão de carbono posteriormente.

Tabela 10 — Fatores de emissão de materiais metálicos internacionais

Materiais	Emissão (tCO₂/t)	Fonte
Barras e hastes de aço virgem	2,590000	Hammond e Jones (2011)
Seções de aço virgem	2,820000	Hammond e Jones (2011)
Arames de aço virgem	2,830000	Hammond e Jones (2011)
Barras e hastes de aço reciclado	0,420000	Hammond e Jones (2011)
Seções de aço reciclado	0,440000	Hammond e Jones (2011)

Fonte: Autora (2025).

Tabela 11 — Fatores de emissão de eletrodos de soldagem

Materiais	Emissão (tCO₂/t)	Fonte
Eletrodo E70S (inclui E70S-3, -5, -6)	0,005200	US EPA (1994)
Eletrodo E6010	0,025600	US EPA (1994)
Eletrodo E6013	0,019700	US EPA (1994)
Eletrodo E316LT (inclui E316LT-3)	0,008500	US EPA (1994)
Eletrodo E70T (inclui E70T-1, -2, -4, -5, -7, -G)	0,015100	US EPA (1994)
Eletrodo E71T (inclui E71T-1, -11)	0,012200	US EPA (1994)

Fonte: Autora (2025).

Tabela 12 — Fatores de emissão de concretos internacionais

Materiais	Emissão (tCO₂/t)	Fonte
Concreto 20 MPa	0,093000	Hammond e Jones (2011)
Concreto 25 MPa	0,100000	Hammond e Jones (2011)
Concreto 30 MPa	0,106000	Hammond e Jones (2011)
Concreto 35 MPa	0,112000	Hammond e Jones (2011)
Concreto 40 MPa	0,123000	Hammond e Jones (2011)
Concreto 50 MPa	0,141000	Hammond e Jones (2011)

Fonte: Autora (2025).

Tabela 13 — Fatores de emissão de concretos CP internacionais

Materiais	Emissão (tCO₂/t)	Fonte
Concreto 20 MPa - CP	0,120000	Hammond e Jones (2011)
Concreto 25 MPa - CP	0,127000	Hammond e Jones (2011)
Concreto 30 MPa - CP	0,133000	Hammond e Jones (2011)
Concreto 35 MPa - CP	0,139000	Hammond e Jones (2011)
Concreto 40 MPa - CP	0,150000	Hammond e Jones (2011)
Concreto 50 MPa - CP	0,168000	Hammond e Jones (2011)

Fonte: Autora (2025).

Tabela 14 — Fatores de emissão de argamassas internacionais

Materiais	Emissão (tCO₂/t)	Fonte
Argamassa (1:0,6:5)	0,197000	Hammond e Jones (2011)
Argamassa (1:0,6:7,5)	0,162000	Hammond e Jones (2011)
Argamassa (1:0,6:10)	0,142000	Hammond e Jones (2011)
Argamassa (1:1,2:7,5)	0,190000	Hammond e Jones (2011)
Argamassa (1:1,2:11)	0,159000	Hammond e Jones (2011)
Argamassa (1:1,2:15)	0,139000	Hammond e Jones (2011)
Argamassa (1:1,7:10)	0,186000	Hammond e Jones (2011)
Argamassa (1:1,7:15)	0,155000	Hammond e Jones (2011)
Argamassa (1:1,7:20)	0,137000	Hammond e Jones (2011)

Fonte: Autora (2025).

Tabela 15 — Fatores de emissão de polímeros e água internacionais

Materiais	Emissão (tCO₂/t)	Fonte
Polietileno de Alta Densidade	2,020000	Hammond e Jones (2011)
Nylon 6.6	6,500000	Hammond e Jones (2011)
Água 01	0,000181	Shimizu, Dejima e Tayosada (2012)
Água 02	0,000137	Presura e Robescu (2017)

Fonte: Autora (2025).

A pesquisa também se inspirou em outras obras que utilizaram estacas raiz e estacas hélice, analisando como os fatores de emissão foram aplicados nesses contextos. Isso permitiu a inclusão de materiais e métodos que já foram comprovados em estudos anteriores, garantindo maior confiabilidade aos dados. A base foi projetada para ser flexível, podendo ser adaptada conforme novas descobertas na área de construção civil e sustentabilidade, com foco na redução das emissões de carbono. As Tabelas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 é uma base de dados dos fatores de emissões de materiais de transporte nacionais.

Tabela 16 — Fatores de emissão de materiais de transporte nacionais

Material	Emissão	Fonte
Gasolina pura (tCO ₂ /L)	0,002700	Costa (2012)
Óleo diesel puro (tCO ₂ /L)	0,003200	Costa (2012)
Álcool etílico hidratado puro (tCO ₂ /L)	0,001800	Costa (2012)
Óleo diesel puro – móvel (tCO ₂ /L)	0,002603	PBGHG (2023)
Biodiesel – móvel (tCO ₂ /L)	0,002431	PBGHG (2023)
Gasolina pura – móvel (tCO ₂ /L)	0,002212	PBGHG (2023)
Álcool etílico hidratado puro – móvel (tCO ₂ /L)	0,001457	PBGHG (2023)
Óleo diesel puro – estacionária (tCO ₂ /L)	0,002630	PBGHG (2023)
Biodiesel – estacionária (tCO ₂ /L)	0,002460	PBGHG (2023)
Gasolina pura – estacionária (tCO ₂ /L)	0,002240	PBGHG (2023)
Álcool etílico hidratado puro – estacionária (tCO ₂ /L)	0,001510	PBGHG (2023)
Eletricidade (tCO ₂ /MWh)	0,038510	Brasil (2023)

Fonte: Autora (2025).

Em sequência, foi implementada uma calculadora de carbono, utilizando os fatores

de emissão obtidos na base de dados. Essa ferramenta possibilitou calcular o impacto ambiental total de uma obra, considerando todos os materiais e processos envolvidos na construção das fundações profundas. A calculadora permite que engenheiros e gestores de obra estimem com precisão a quantidade de carbono emitido, facilitando a adoção de práticas mais sustentáveis e a redução do impacto ambiental nas obras de construção. As Tabelas 10, 11, 12, 13, 14, 15 é uma base de dados dos fatores de emissões de materiais de transporte internacionais.

Tabela 17 — Fatores de emissão de materiais de transporte internacionais

Material	Emissão	Fonte
Gasolina (tCO ₂ /L)	0,002319	US EPA (2023)
Óleo diesel (tCO ₂ /L)	0,002697	US EPA (2023)
Álcool etílico hidratado (tCO ₂ /L)	0,001519	US EPA (2023)
Eletricidade (tCO ₂ /MWh)	0,386600	US EPA (2023)

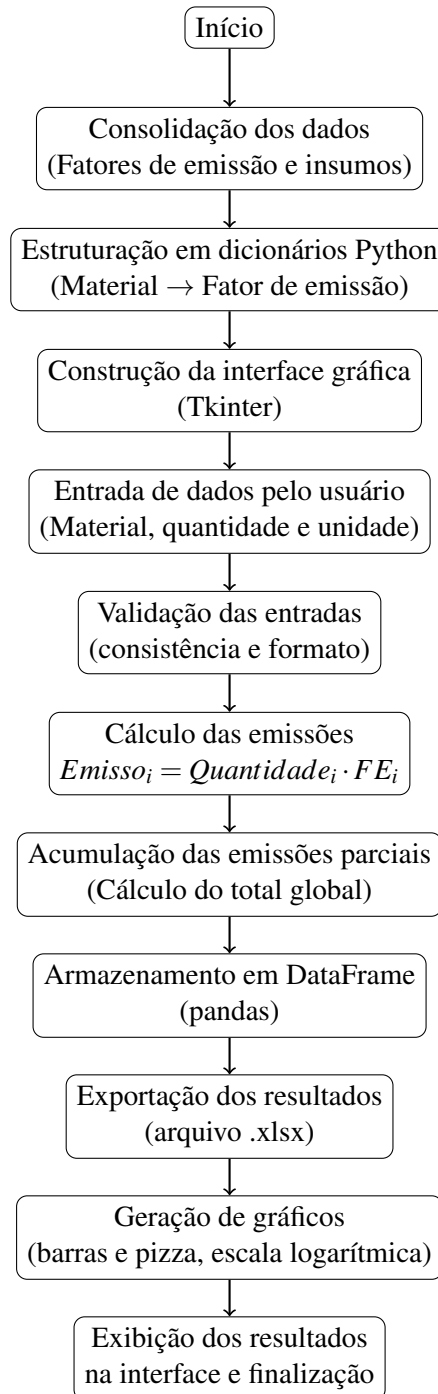
Fonte: Autora (2025).

A Tabela 16 e a Tabela 17 representam os dados relacionados aos transportes e energia, fornecendo uma base abrangente de fatores de emissão de carbono para materiais utilizados em contextos nacionais e internacionais. Esses dados foram incorporados à pesquisa para complementar o desenvolvimento da calculadora de carbono, permitindo maior acurácia no cálculo do impacto ambiental em obras de construção com fundações profundas.

3.4 Desenvolvimento da Calculadora

A construção da ferramenta computacional foi orientada por critérios de clareza na interface, reprodutibilidade dos cálculos e compatibilidade com formatos amplamente utilizados em ambientes institucionais. O sistema foi desenvolvido integralmente em Python, com o apoio de bibliotecas consolidadas (*Pandas*, *Matplotlib*, *Tkinter*) da comunidade científica e técnica. O desenvolvimento envolveu quatro etapas principais: a definição da interface gráfica, a implementação do núcleo de cálculo, o armazenamento e exportação dos dados e, por fim, a geração de visualizações gráficas para apoio à análise Figura 11.

Figura 11 — Fluxograma do desenvolvimento e funcionamento da calculadora de emissões.



Fonte: Autor (2025).

3.4.1 Estruturação da Interface Gráfica

A biblioteca *Tkinter* foi escolhida como base para a interface gráfica da ferramenta, devido à sua compatibilidade com o ecossistema Python e à facilidade de construção de janelas interativas sem a necessidade de bibliotecas externas adicionais. A estrutura da interface foi

desenhada com o objetivo de facilitar a inserção manual de dados por usuários não especializados, oferecendo campos de entrada, menus suspensos e botões organizados em um layout limpo e intuitivo.

Foram definidos elementos específicos para representar os parâmetros de entrada necessários à estimativa de emissões, como o tipo de material, sua quantidade e unidade correspondente. Esses elementos foram organizados em grupos funcionais, permitindo o preenchimento sequencial e minimizando erros de entrada. Os botões acionam funções internas que processam os dados inseridos e atualizam os resultados apresentados na própria interface.

A interface também foi projetada para reagir a eventos de entrada de maneira eficiente, utilizando o modelo de programação orientado a eventos (event-driven), o que permite que as ações do usuário, como cliques ou modificações nos campos de texto, sejam tratadas dinamicamente. Essa abordagem melhora a experiência de uso e reduz a possibilidade de falhas operacionais.

A calculadora foi projetada com uma interface simples que permite a entrada de dados relacionados a materiais e quantidades utilizadas em obras de fundações profundas. Ela utiliza os fatores de emissão previamente armazenados nos dicionários categorizados. A estrutura principal da calculadora inclui:

- **Entrada de Dados:** Os usuários fornecem os parâmetros específicos da obra, como material e quantidade de materiais, além do combustível/energia consumido.
- **Processamento:** A ferramenta cruza as informações inseridas com os fatores de emissão para calcular a emissão total.
- **Resultados:** As emissões são exibidas em forma de relatórios, gráficos e exportadas para planilhas.

É importante ressaltar que essa calculadora desenvolvida é um protótipo com o objetivo principal de calcular e apresentar os resultados totais da emissão de carbono em obras de fundações profundas. Sendo assim, o foco principal do desenvolvimento foi a funcionalidade e a acurácia dos cálculos, enquanto os aspectos visuais e de design foram planejados apenas para atender às necessidades básicas da pesquisa. O protótipo, apresentado na Figura 12, não possui elementos gráficos sofisticados ou funcionalidades avançadas de interface, mas cumpre de maneira eficiente o propósito de estimar as emissões de carbono e auxiliar na análise ambiental.

Embora o design seja simplificado, o protótipo possui potencial para ser aprimorado em futuras iterações. Melhorias na interface gráfica poderiam torná-lo mais intuitivo e acessível,

permitindo uma experiência de usuário mais fluida. Além disso, a incorporação de recursos adicionais, como relatórios personalizados e comparações detalhadas entre diferentes cenários de construção, poderia ampliar ainda mais sua aplicabilidade prática em projetos reais. Essa base funcional já consolidada, aliada à possibilidade de expansão, torna a calculadora uma ferramenta promissora para o setor da construção sustentável.

Figura 12 — Protótipo da Calculadora de Carbono.

Calculadora de Carbono da Thaís Silva de Araújo

Entrada:

Material:

Quantidade:

Resultado:

Total de Carbono Emitido: 0.000000 tCO₂e

Adicionar Remover

Salvar Excel Gerar Gráfico

Fonte: Autora (2025).

3.4.2 Implementação do Cálculo de Emissões

A lógica central do sistema consiste na multiplicação direta entre os fatores de emissão de cada material e a quantidade informada pelo usuário. Esses fatores foram previamente organizados em estruturas do tipo dicionário, associando cada material a um valor numérico representativo de suas emissões específicas (em kg de CO₂ por unidade).

Durante a execução, a ferramenta percorre os elementos preenchidos, busca os

fatores correspondentes no dicionário, realiza a multiplicação e acumula os valores parciais para compor o total global de emissões. Essa abordagem simplificada favorece a legibilidade do código e a adaptação futura para incorporação de novos materiais ou ajustes metodológicos. O sistema também verifica a validade das entradas para evitar inconsistências computacionais.

3.4.3 Armazenamento e Exportação de Dados

Os resultados obtidos durante o processamento são armazenados em estruturas *DataFrame*, utilizando a biblioteca *pandas*. Essa escolha permite manipular os dados de forma tabular, facilitando a exportação e a aplicação de filtros ou agregações. A exportação é realizada no formato *.xlsx*, compatível com ferramentas como Microsoft Excel, Google Sheets e LibreOffice.

A planilha gerada contém os materiais informados, suas quantidades, os fatores de emissão utilizados e os resultados totais. Esse arquivo serve como base para análises posteriores, arquivamento institucional ou integração com sistemas de relatórios ambientais. A estrutura da planilha foi organizada para facilitar a leitura e permitir reuso dos dados por diferentes departamentos.

O processo de exportação foi implementado de forma automatizada, com a geração de nomes de arquivos contendo informações contextuais, como data, hora ou nome do projeto. Isso evita sobrescritas acidentais, facilita a organização de diferentes execuções e favorece o versionamento informal dos resultados.

3.4.4 Geração de Gráficos e Escalonamento Visual

Para complementar a apresentação dos resultados, a ferramenta oferece a geração de gráficos em dois formatos: barras e pizza. A biblioteca *matplotlib* foi utilizada para esse fim, permitindo a construção de visualizações personalizáveis e exportáveis. Cada gráfico é gerado a partir dos valores calculados, destacando visualmente a contribuição relativa de cada item.

Devido à elevada variabilidade nos fatores de emissão, alguns superiores a 10^4 em relação a outros, foi adotada a escala logarítmica nos eixos dos gráficos. Essa escolha técnica permite representar os dados sem distorção visual excessiva, mantendo a proporcionalidade entre os elementos e possibilitando uma leitura comparativa mais eficaz. As representações visuais são exibidas diretamente na interface, com possibilidade de exportação para documentos externos.

3.5 Análise dos Resultados

Após a aplicação da calculadora, os resultados foram sistematicamente avaliados para atender aos objetivos específicos. Foram realizadas:

1. Comparações entre as técnicas de fundação: As emissões totais de carbono associadas às estacas raiz e hélice contínua foram analisadas em relação a diferentes variáveis, como consumo de materiais e eficiência energética.
2. Identificação de Estratégias de Mitigação: Com base nos resultados, foram propostas estratégias para minimizar as emissões em etapas específicas do processo de fundação.
3. Cálculo de Neutralização: A estimativa do número de árvores necessárias para neutralizar as emissões foi incluída como parte da análise.

3.6 Etapas do Processo Construtivo Consideradas

As etapas do processo construtivo consideradas foram definidas de modo a representar os procedimentos executivos típicos das fundações profundas analisadas. Para as estacas raiz, o processo compreende a perfuração do solo, a limpeza do furo, a instalação da armadura, a injeção da argamassa e a remoção dos revestimentos, conforme ilustrado na Figura 13. Para as estacas hélice contínua, as etapas incluem a perfuração com hélice contínua, a injeção de concreto sob pressão, a retirada da hélice e a instalação da armadura, conforme a Figura 14. A consideração dessas etapas assegura coerência entre o processo executivo e o inventário de dados utilizado na estimativa das emissões.

Figura 13 — Etapas Estacas Raiz.



Fonte: Autora (2025).

Figura 14 — Etapas Estacas Hélice Continua.



Fonte: Autora (2025).

3.7 Limitações

Esta metodologia apresenta algumas limitações. A utilização de fatores médios de emissão pode não capturar variações específicas de determinados materiais ou processos. Além disso, o modelo da calculadora depende da precisão dos dados inseridos, o que requer a validação contínua dos fatores de emissão e da base de dados.

3.7.1 Delimitação das fronteiras do sistema

A definição das fronteiras do sistema constitui uma etapa fundamental em estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), pois determina quais processos e etapas do ciclo de vida serão considerados na análise. Neste trabalho, adotou-se a abordagem *gate-to-gate* (portão a portão), que contempla exclusivamente as etapas relacionadas à execução das fundações no canteiro de obras.

Essa abordagem considera os processos diretamente associados à execução das estacas, incluindo o consumo de materiais, energia e demais insumos utilizados durante a etapa construtiva. Dessa forma, foram analisadas as emissões de carbono associadas à utilização de concreto, aço, combustíveis e demais recursos empregados nas atividades de perfuração, concretagem e execução das fundações profundas.

A escolha dessa abordagem metodológica está relacionada à disponibilidade de dados primários obtidos nas obras analisadas, os quais permitiram caracterizar com maior precisão os processos executivos observados em campo. As etapas anteriores e posteriores do ciclo de vida dos materiais, como a extração de matérias-primas, processos industriais de fabricação, transporte em larga escala e o fim de vida das estruturas, não foram consideradas na análise.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados da pesquisa, consolidando a aplicação prática da metodologia proposta para a quantificação das emissões de gases de efeito estufa associadas à execução de fundações profundas, com foco nas estacas raiz e nas estacas hélice contínua. Destaca-se que o código-fonte completo da ferramenta computacional utilizada para geração desses resultados, bem como sua documentação, encontram-se disponíveis publicamente no repositório GitHub, acessível em <<https://github.com/thais-araujo94/dissertation-carbon-emissions-calculator>>, assegurando transparência, reprodutibilidade e potencial de aplicação e aprimoramento em pesquisas futuras.

A análise das emissões de carbono provenientes da execução das estacas raiz da obra estudada, que contém 224 estacas com diâmetros de aproximadamente 400 milímetros e profundidade entre 24 e 25 metros, cujo o período de execução foi de julho de 2024 a abril de 2025 permitiu identificar a contribuição de diferentes materiais e insumos empregados no processo construtivo. O total de emissões aferido foi de 942,14 tCO₂e (Tabela 18), valor que reflete a soma dos principais insumos utilizados, conforme discriminado a seguir:

Tabela 18 — Emissões de CO₂ e associadas aos insumos utilizados na execução das estacas raiz.

Insumo	Quantidade	Unidade	Emissões (tCO ₂ e)
Água	1.594,00	L	318,80
Areia	1.246,23	t	28,19
Barras de aço	224,00	t	413,32
Cimento	450,60	t	21,83
Óleo diesel	50.000,00	L	160,00
Total	-	-	942,14

Fonte: Autora (2025).

O maior impacto ambiental foi associado ao uso de barras de aço (Figura 15), representando aproximadamente 43,9% do total de emissões. Esse resultado corrobora com estudos de Fachinelli e Relva (2025) , que apontam o aço como um dos insumos mais intensivos em carbono na indústria da construção, em razão do elevado consumo energético no processo siderúrgico.

Figura 15 — Cálculo Emissões CO₂e Barras de Aço.

Calculadora de Carbono da Thaís Silva de Araújo

Entrada: Materials Nacionais

Material: Barras de aço (t)

Quantidade: 224

Material	Fator de Emissão	Total
Barras de aço (t)	413.3248	413.3248

Adicionado: Barras de aço (t) - 413.324800 tCO₂e

Total de Carbono Emitido: 413.324800 tCO₂e

Adicionar Remover

Salvar Excel Gerar Gráfico

Fonte: Autora (2025).

Na sequência, destaca-se a água (Figura 16) de amassamento e uso em obra, responsável por cerca de 33,8% das emissões totais. Apesar de ser usualmente considerada um recurso de baixo impacto direto, o transporte e tratamento da água em grandes volumes gera emissões significativas, como também discutido por (Maciel; Junior; Andrezza, 2024) .

Figura 16 — Cálculo Emissões CO₂e Água.

Calculadora de Carbono da Thaís Silva de Araújo

Entrada: Materiais Nacionais

Material: Água (L)

Quantidade: 1594000

Material	Fator de Emissão	Total
Água (L)		318.8

Resultado: 318.800000 tCO₂e

Total de Carbono Emitido: 318.800000 tCO₂e

Adicionar
Remover

Salvar Excel
Gerar Gráfico

Fonte: Autora (2025).

O consumo de óleo diesel puro (Figura 17) foi responsável por 17% das emissões totais, refletindo o uso intensivo de equipamentos de perfuração, bombeamento de argamassa e transporte interno de materiais. Conforme estudos de Maciel *et al.* (2015), que ressalta a relevância do consumo de combustíveis fósseis em obras de fundações profundas, sobretudo em estacas raiz, onde há maior dependência de equipamentos de perfuração contínua.

Figura 17 — Cálculo Emissões CO₂ e Óleo Diesel.

Calculadora de Carbono da Thaís Silva de Araújo

Entrada: Materials de Transporte

Material: Óleo diesel puro (L)

Quantidade: 50000

Material	Fator de Emissão	Total
Óleo diesel puro (L)	160.0	

Resultado: 160.000000 tCO₂e

Total de Carbono Emitido: 160.000000 tCO₂e

Adicionar Remover

Salvar Excel Gerar Gráfico

Fonte: Autora (2025).

O cimento (Figura 18) e a areia apresentaram contribuições menores, de 2,3% e 3%, respectivamente, para o total de emissões. Embora o cimento seja reconhecidamente um dos maiores emissores de CO₂ no setor da construção civil (Stachera e Casagrande, 2008), neste caso a quantidade utilizada foi relativamente menor em comparação ao aço e à água, resultando em uma contribuição proporcionalmente reduzida.

Figura 18 — Cálculo Emissões CO₂ e Cimento.

Calculadora de Carbono da Thaís Silva de Araújo

Entrada: Materials Nacionais

Material: Cimento (t)

Quantidade: 450.6

Material	Fator de Emissão Total
Cimento (t)	21.827064

Adicionado: Cimento (t) - 21.827064 tCO₂e

Total de Carbono Emitido: 21.827064 tCO₂e

Adicionar Remover

Salvar Excel Gerar Gráfico

Fonte: Autora (2025).

Em termos gerais, o valor final de 942,14 tCO₂e para a execução de 224 estacas raiz equivale a uma média de 4,2 tCO₂e por estaca, o que evidencia o impacto expressivo dessa solução de fundação (Figura 19). Para efeito comparativo, estudos recentes sobre pegada de carbono em fundações profundas (Mazzutti, 2023; Abushama *et al.*, 2023) apontam que sistemas de estacas moldadas in loco apresentam emissões significativamente mais elevadas que fundações superficiais, mas oferecem desempenho estrutural superior em terrenos de baixa capacidade de carga.

Figura 19 — Cálculo Emissões CO₂e Total Obra Estaca Raiz.

Calculadora de Carbono da Thaís Silva de Araújo

Entrada: Materiais de Transporte ▼

Material: Óleo diesel puro (L) ▼

Quantidade: 50000

Material	Fator de Emissão Total
Cimento (t)	21.827064
Areia (t)	28.189723
Água (L)	318.800000
Barras de aço (t)	413.324800
Óleo diesel puro (L)	160.000000

Resultado: 160.000000 tCO₂e

Total de Carbono Emitido: 942.141587 tCO₂e

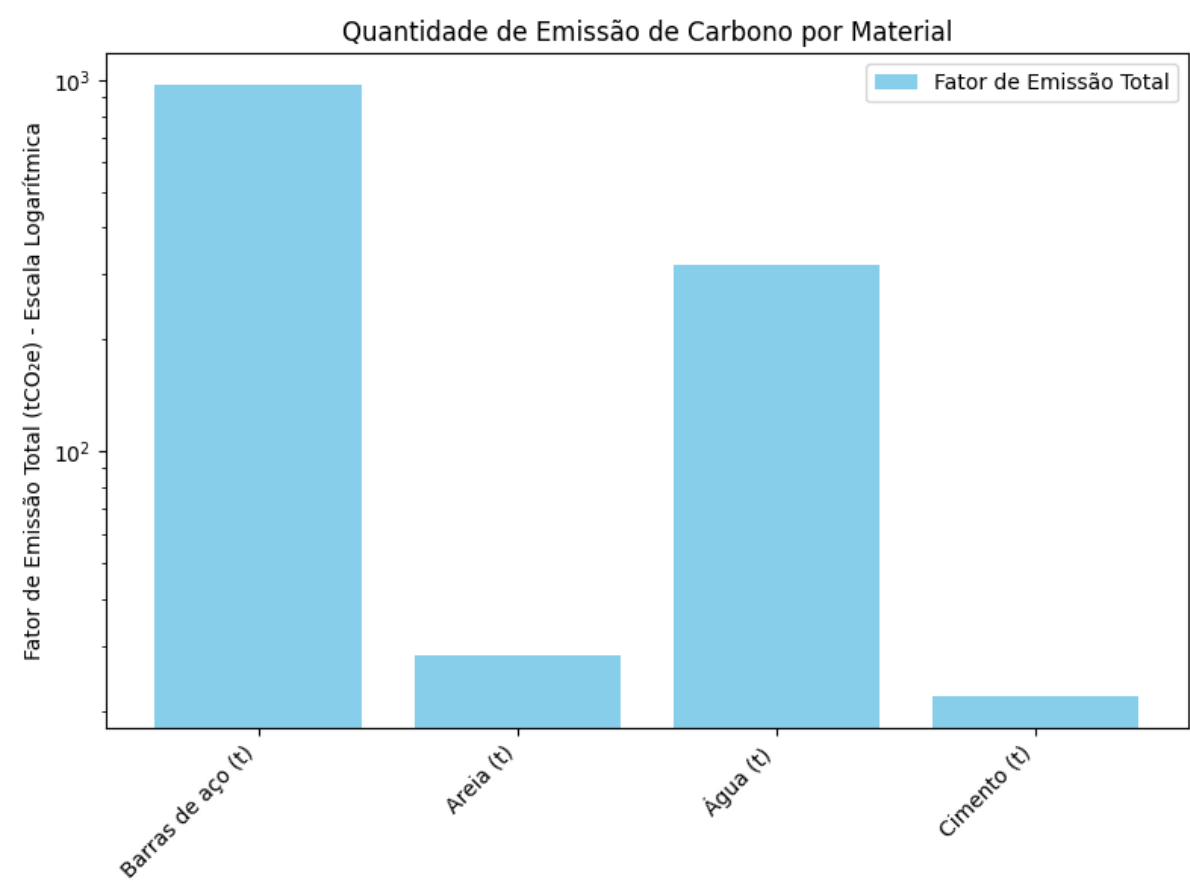
Adicionar Remover

Salvar Excel Gerar Gráfico

Fonte: Autora (2025).

A análise do gráfico de barras em escala logarítmica (Figura 20), gerado pela calculadora, evidencia de forma clara a disparidade entre os materiais quanto ao fator de emissão de carbono. As barras de aço apresentam o maior impacto, com emissões superiores a 400 tCO₂e, destacando-se significativamente em relação aos demais insumos. Esse resultado é coerente com o fato de que a produção do aço é altamente intensiva em energia e depende de processos industriais que emitem grandes quantidades de gases de efeito estufa (Silva, 1976). A água, apesar de frequentemente ser considerada um insumo de baixo impacto, aparece como o segundo maior contribuinte, resultado do grande volume consumido no processo, o que demonstra a relevância do uso racional dos recursos hídricos (Campos, 2011). Já a areia e o cimento, embora essenciais na execução, possuem impacto relativamente reduzido em comparação ao aço, o que ressalta a importância de se avaliar a pegada de carbono não apenas pela massa consumida, mas também pelo fator de emissão de cada material (Stachera e Casagrande, 2008).

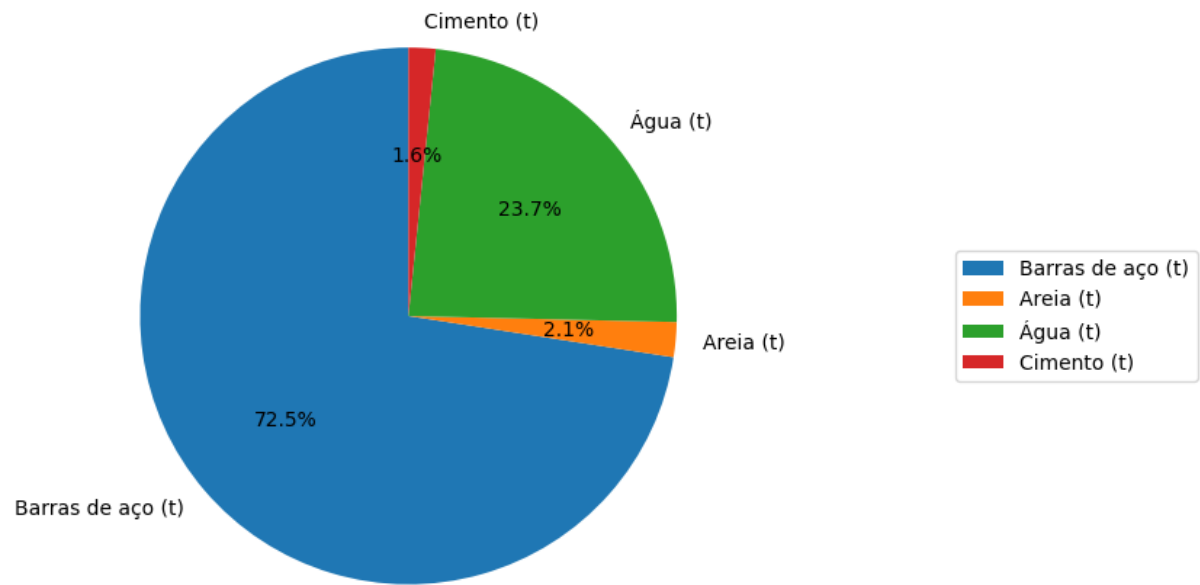
Figura 20 — Quantidade de Emissão de Carbono por Material (CO₂e).



Fonte: Autora (2025).

O gráfico em pizza (Figura 21), gerado pela calculadora, complementa essa análise ao apresentar a distribuição percentual das emissões. Nota-se que o aço responde por aproximadamente 72,5% do total de emissões, tornando-se o principal alvo para estratégias de mitigação de impacto ambiental no ciclo de vida das estacas raiz. A água aparece em segundo lugar, com cerca de 23,7% das emissões, seguida pela areia (2,1%) e pelo cimento (1,6%). Esse panorama reforça a necessidade de priorizar tecnologias que possibilitem a redução do consumo de aço ou a substituição parcial por alternativas mais sustentáveis, como materiais reciclados ou técnicas construtivas otimizadas (Pereira *et al.*, 2024). Além disso, sugere-se uma maior atenção para estratégias de eficiência hídrica, já que o elevado consumo de água não apenas impacta o balanço ambiental, mas também pressiona recursos naturais em regiões com disponibilidade limitada (Han, 2024).

Figura 21 — Distribuição Percentual da Emissão de Carbono por Material.
Distribuição Percentual de Emissão de Carbono



Fonte: Autora (2025).

A segunda obra analisada correspondeu à execução de fundações profundas do tipo estaca hélice contínua, totalizando 165 unidades. Deste conjunto, 82 estacas apresentaram diâmetro nominal de 400 mm, enquanto 83 estacas foram executadas com diâmetro de 500 mm. As profundidades variaram, em média, entre aproximadamente 11 m e 14 m, de acordo com o diâmetro adotado. O total de emissões aferido foi de 83,30 CO₂e, Tabela 19, valor que reflete a soma dos principais insumos utilizados, conforme discriminado a seguir:

Tabela 19 — Emissões de CO₂e associadas à execução de estacas hélice contínua.

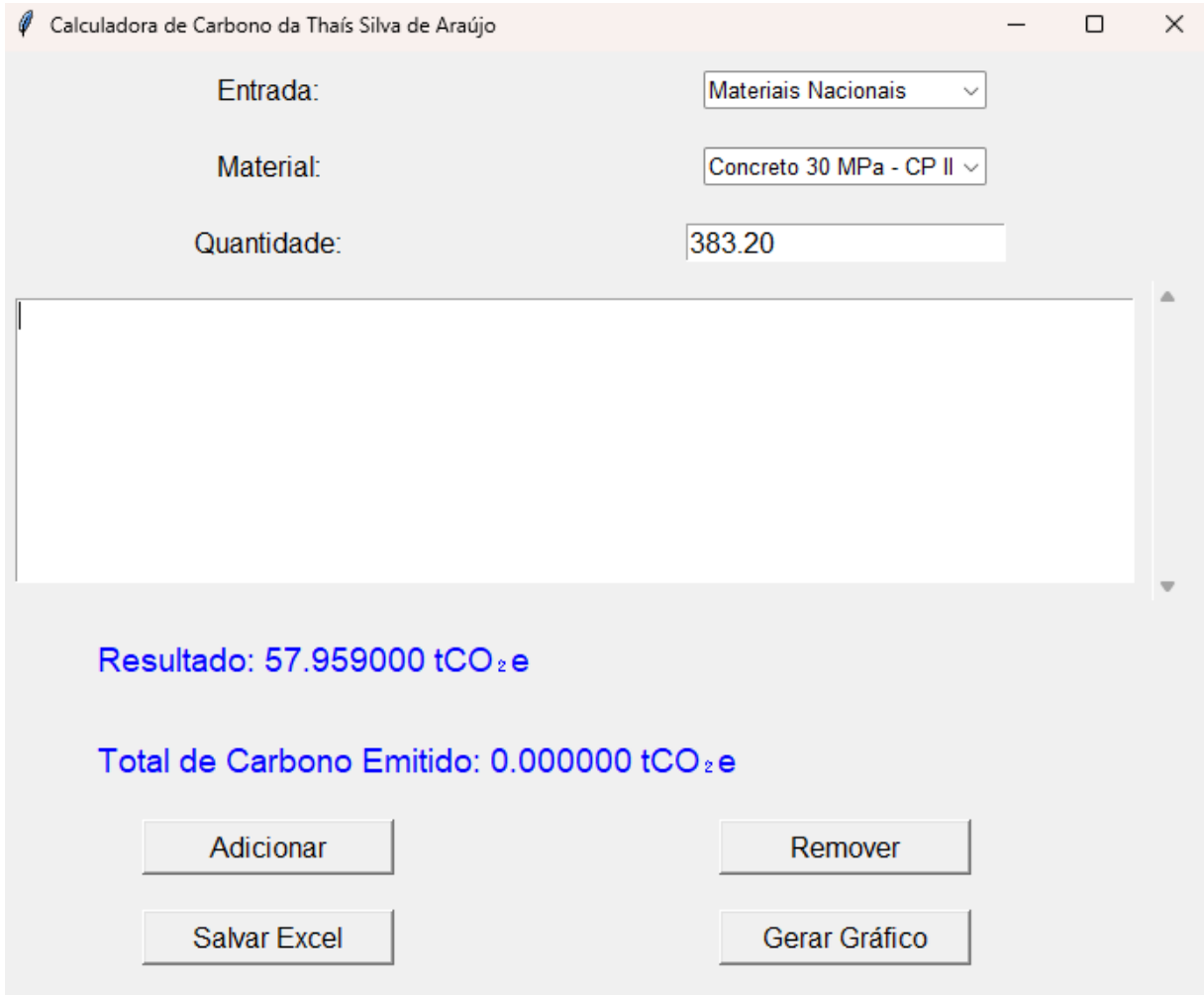
Insumo	Quantidade	Unidade	Emissões (tCO ₂ e)
Barras de aço	8,27	t	15,26
Concreto (30 MPa - CP II)	383,20	t	57,96
Óleo diesel	3.150,00	L	10,08
Total	-	-	83,30

Fonte: Autora (2025).

A análise das emissões de carbono associadas à execução das estacas do tipo hélice contínua revelou um total de 83,30 tCO₂e, considerando os principais insumos empregados: concreto, barras de aço e óleo diesel. A distribuição das emissões evidencia que o concreto foi o material de maior impacto, responsável por aproximadamente 57,96 tCO₂e (cerca de 70% do total), conforme Figura 22. Esse resultado já era esperado, uma vez que a produção de cimento

principal componente do concreto é altamente intensiva em energia e em emissões decorrentes do processo de calcinação, o que o torna um dos maiores emissores do setor da construção civil (Verdiani *et al.*, 2025).

Figura 22 — Cálculo Emissões CO₂e de Concreto.



Calculadora de Carbono da Thaís Silva de Araújo

Entrada: Materiais Nacionais ▼

Material: Concreto 30 MPa - CP II ▼

Quantidade: 383.20

Resultado: 57.959000 tCO₂e

Total de Carbono Emitido: 0.000000 tCO₂e

Adicionar Remover

Salvar Excel Gerar Gráfico

Fonte: Autora (2025).

As barras de aço contribuíram com 15,26 CO₂e (18% do total), mesmo em quantidades relativamente reduzidas (8,27 t), conforme Figura 23. Isso reforça o elevado fator de emissão do aço, diretamente associado ao processo siderúrgico, que demanda grandes quantidades de energia térmica e elétrica. Apesar de sua participação ser menor em massa quando comparada ao concreto, o aço se destaca como um insumo crítico no balanço de carbono da obra.

Figura 23 — Cálculo Emissões CO₂e de Aço.

Calculadora de Carbono da Thaís Silva de Araújo

Entrada:

Material:

Quantidade:

Resultado: 15.259804 tCO₂e

Total de Carbono Emitido: 0.000000 tCO₂e

Fonte: Autora (2025).

Por fim, o óleo diesel consumido nos equipamentos de perfuração e concretagem gerou 10,08 CO₂e (12% do total), apresentado na Figura 24. Esse valor mostra que, embora o combustível não seja o principal responsável pelas emissões, sua participação é relevante, sobretudo em obras de fundações profundas, onde há elevado consumo de maquinário pesado.

Figura 24 — Cálculo Emissões CO₂e de Óleo Diesel Puro.

Calculadora de Carbono da Thaís Silva de Araújo

Entrada:

Material:

Quantidade:

Resultado: 10.080000 tCO₂e

Total de Carbono Emitido: 0.000000 tCO₂e

Fonte: Autora (2025).

A análise dos resultados evidencia que a execução das estacas do tipo hélice contínua (Figura 25) possui sua maior contribuição para a emissão de carbono associada ao consumo de concreto e barras de aço, que juntos representam a parcela predominante do impacto ambiental.

Figura 25 — Cálculo Emissões CO₂e Total Obra Estaca Hélice Contínua.

Calculadora de Carbono da Thaís Silva de Araújo

Entrada: Materials Nacionais

Material: Concreto 30 MPa - CP II

Quantidade: 383.2

Material	Fator de Emissão	Total
Óleo diesel puro (L)	10.080000	
Barras de aço (t)	15.259804	
Concreto 30 MPa - CP II-E-32 - CO (t)	57.959000	

Resultado: 57.959000 tCO₂e

Total de Carbono Emitido: 83.298804 tCO₂e

Adicionar Remover

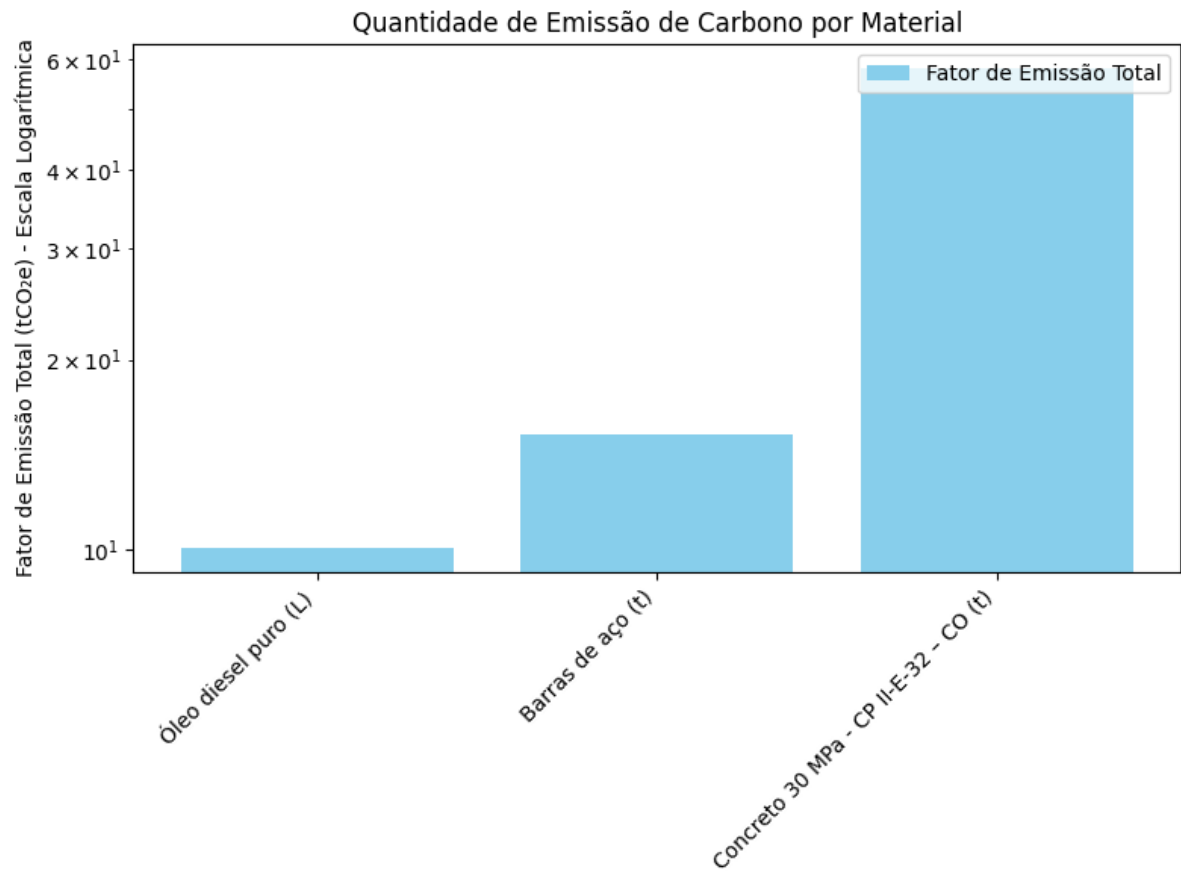
Salvar Excel Gerar Gráfico

Fonte: Autora (2025).

Os gráficos apresentados permitem uma análise mais detalhada da contribuição relativa de cada insumo para a emissão total de carbono durante a execução das estacas do tipo hélice contínua. No gráfico de barras (Figura 26) em escala logarítmica, observa-se que o concreto (30 MPa – CP II-E-32) se destaca como o principal responsável pelas emissões, atingindo aproximadamente 57,96 CO₂e, valor significativamente superior ao do aço (15,26 CO₂e) e ao do óleo diesel (10,08 tCO₂e).

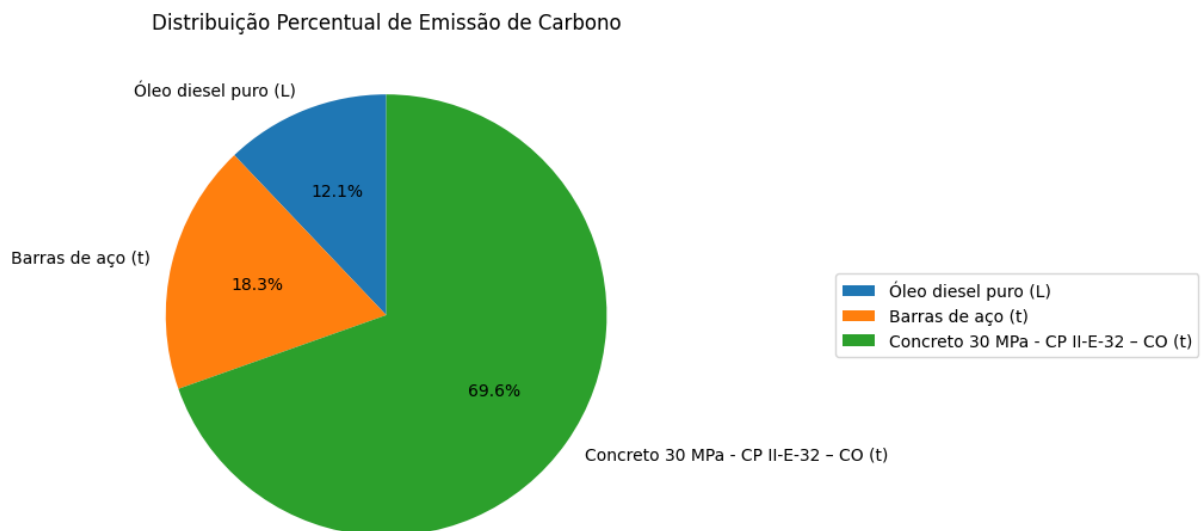
Já o gráfico em formato de pizza (Figura 27) ilustra a participação percentual de cada insumo no total de emissões (83,30 CO₂e), reforçando a predominância do concreto, que representa cerca de 70% das emissões totais. Em seguida, destacam-se as barras de aço (18,3%) e, por fim, o óleo diesel (12,1%).

Figura 26 — Quantidade de Emissão de Carbono por Material CO₂e.



Fonte: Autora (2025).

Figura 27 — Distribuição Percentual da Emissão de Carbono por Material.



Fonte: Autora (2025).

A comparação entre as duas obras analisadas revela diferenças significativas no

padrão de emissões de carbono associadas à execução das fundações. A obra com estacas raiz apresentou uma emissão total de 942,14 tCO₂e, valor é superior ao registrado para as estacas hélice contínua, cuja soma foi de apenas 83,30 tCO₂e. Essa discrepância evidencia como as características construtivas e os insumos empregados em cada tecnologia influenciam diretamente na pegada de carbono da execução (Tabela 20).

Tabela 20 — Cálculos de Volume e Emissões Normalizadas.

Tipo de estaca	Diâmetro (mm)	Comp. médio (m)	Nº de estacas	Vol. unitário (m³)	Vol. total (m³)	Emissões totais (tCO₂e)	Emissão normalizada (tCO₂e/m³)
Raiz	400	24,5	224	3,08	690,00	942,14	1,37
Hélice Contínua	400	12,5	82	1,57	128,82	—	—
Hélice Contínua	500	12,5	83	2,45	203,68	—	—
H.C (Total)	—	—	165	—	332,50	83,30	0,25

Fonte: Autora (2025).

Os resultados apresentados na Tabela 20 evidenciam diferenças expressivas entre as tipologias de fundações profundas analisadas. As estacas raiz, com diâmetro de 400 mm e comprimento médio de 24,5 m, resultaram em um volume total de 690,00 m³ e emissões totais de 942,14 tCO₂e, o que corresponde a uma emissão normalizada de 1,37 tCO₂e/m³. Por sua vez, o conjunto de estacas hélice contínua, apesar de apresentar variação de diâmetro entre 400 mm e 500 mm e comprimentos médios entre 11 m e 14 m, totalizou um volume de 332,50 m³ e emissões globais de 83,30 tCO₂e, resultando em uma emissão normalizada significativamente inferior, da ordem de 0,25 tCO₂e/m³. Esses resultados indicam que, para os casos analisados, a tipologia de estaca exerce influência direta sobre a intensidade das emissões por unidade de volume executado, reforçando a importância da escolha do método construtivo no desempenho ambiental das fundações profundas.

Outro ponto a ser destacado é a escala de cada empreendimento. Apesar da obra com estacas raiz ter utilizado 224 unidades, contra 165 estacas na hélice contínua, a diferença no número de elementos não explica sozinha a magnitude das emissões. O maior consumo de água, aço e combustível diesel na estaca raiz contribuiu para uma intensidade de emissões desproporcionalmente elevada, o que se relaciona diretamente com a natureza da técnica, que demanda mais etapas e insumos por metro linear executado (Li; Zheng, 2020).

A análise comparativa entre as duas obras demonstra que a escolha do tipo de fundação impacta fortemente o desempenho ambiental da construção. A estaca hélice contínua

mostrou-se mais eficiente em termos de emissões, tanto em valores absolutos quanto relativos, sugerindo que, sempre que tecnicamente viável, sua utilização pode representar uma estratégia de mitigação importante no setor da construção civil (Bao *et al.*, 2024) .

Com base na abordagem adotada para a compensação de carbono, essas emissões corresponderiam à necessidade de plantio aproximado de 5.777 e 511 árvores nativas da Mata Atlântica, respectivamente, para que seja alcançada a neutralização completa ao longo de um período de 20 anos, Tabela 21, esse cálculo foi realizado considerando como parâmetro a capacidade média de sequestro de carbono de 163,14 kg de CO₂e por árvore ao longo de 20 anos, conforme valores reportados em estudos sobre restauração florestal com espécies nativas da Mata Atlântica. A expressiva diferença entre os sistemas evidencia que a tipologia de fundação exerce influência direta sobre a magnitude das emissões geradas e, consequentemente, sobre o esforço necessário para a compensação ambiental associada às atividades construtivas analisadas.

Tabela 21 — Emissões de carbono e estimativa de compensação por meio de árvores

Sistema de fundação	Emissões (tCO₂e)	Árvores necessárias (20 anos)
Estacas raiz	942,14	5.777
Estacas hélice contínua	83,30	511

Fonte: Autora (2025).

Esse resultado evidencia a disparidade entre os dois sistemas de fundação, não apenas em termos de emissões absolutas, mas também no impacto por unidade executada, reforçando a necessidade de considerar alternativas construtivas menos intensivas em carbono quando a viabilidade técnica permitir (Asadnabizadeh; Moe, 2024; Bao *et al.*, 2024).

4.1 Estimativa de emissões para estacas raiz

Para a estimativa das emissões associadas às estacas raiz, foram considerados os principais insumos utilizados durante sua execução, incluindo água, areia, barras de aço, cimento e óleo diesel. Esses materiais representam a maior parcela dos impactos ambientais relacionados à execução desse tipo de fundação profunda, especialmente em função do consumo significativo de aço e combustível durante as operações de perfuração e injeção.

As emissões foram calculadas a partir da multiplicação entre a quantidade de material consumido e os respectivos fatores de emissão, expressos em tCO₂ por unidade de massa, conforme metodologia baseada em fatores de emissão amplamente referenciados na literatura técnica (Costa, 2012; Hammond; Jones, 2011) .

A Tabela 22 apresenta os valores de quantidade de material utilizados no cálculo, bem como os respectivos fatores de emissão e as emissões estimadas de CO₂.

Tabela 22 — Emissões de CO₂ associadas aos materiais utilizados na execução de estacas raiz

Descrição do material	Especificação do uso	Quantidade (t)	Fator de emissão	Emissão de CO ₂ (tCO ₂)
Água	Execução Estaca Raiz	159.400	0,00020	318,80
Areia	Execução Estaca Raiz	1.246,23	0,02262	28,19
Barras de aço	Execução Estaca Raiz	224,00	1,8452	413,32
Cimento	Execução Estaca Raiz	450,60	0,04844	21,83
Óleo diesel	Execução Estaca Raiz	50.000,00	0,0032	160,00

Fonte: Adaptado Mazzutti (2023).

Observa-se que as maiores contribuições para as emissões totais estão associadas ao consumo de aço e ao uso de óleo diesel, evidenciando a relevância desses insumos no balanço de emissões do processo construtivo.

4.2 Estimativa de emissões para estacas hélice contínua

No caso das estacas hélice contínua monitorada (HCM), os principais materiais considerados no cálculo das emissões foram o concreto estrutural, as barras de aço utilizadas na armadura e o óleo diesel consumido pelos equipamentos durante a execução da estaca.

As emissões foram obtidas por meio da multiplicação entre as quantidades de materiais e seus respectivos fatores de emissão, de forma análoga ao procedimento adotado para as estacas raiz.

A Tabela 23 apresenta as quantidades adotadas, os fatores de emissão aplicados e as emissões totais estimadas para cada material.

Tabela 23 — Emissões de CO₂ associadas aos materiais utilizados na execução de estacas hélice contínua

Descrição do material	Especificação do uso	Quantidade (t)	Fator de emissão	Emissão de CO ₂ (tCO ₂)
Óleo diesel	Execução Estaca Hélice Contínua	3.150,00	0,0032	10,08
Concreto 30 MPa – CP II-E-32	Execução Estaca Hélice Contínua	383,20	0,1513	57,96
Barras de aço	Execução Estaca Hélice Contínua	8,27	1,8452	15,26

Fonte: Adaptado Mazzutti (2023).

Os resultados indicam que o concreto representa a principal fonte de emissões nesse

tipo de fundação, seguido pelo aço estrutural e pelo consumo de combustível dos equipamentos utilizados na execução.

4.3 Comparativo entre estacas

A comparação entre os dois tipos de fundação evidencia diferenças relevantes na composição das emissões. Nas estacas hélice contínua observa-se maior participação do concreto no total de emissões, em função do volume significativo utilizado durante a concretagem da estaca.

Por outro lado, nas estacas raiz destaca-se a elevada contribuição das barras de aço e do consumo de óleo diesel, decorrente das características do processo executivo, que envolve perfuração rotativa e maior demanda energética dos equipamentos utilizados.

Essas diferenças refletem as particularidades construtivas de cada método de fundação e demonstram que a escolha da técnica executiva pode influenciar diretamente o volume de emissões associadas à obra.

4.4 Comparativo entre a calculadora de Mazzutti (2023) e a ferramenta proposta

Com base nas quantidades de materiais adotadas neste estudo, realizou-se a comparação entre os resultados obtidos por meio da calculadora desenvolvida por Mazzutti (2023) e aqueles gerados pela ferramenta proposta nesta dissertação.

A comparação direta entre as duas calculadoras demonstrou que os valores totais de emissões de tCO_2e foram equivalentes, não sendo observada diferença percentual entre as estimativas apresentadas. Esse resultado indica que ambas as ferramentas utilizam fatores de emissão compatíveis e aplicam procedimentos matemáticos equivalentes para a quantificação das emissões.

No que se refere à operacionalização, entretanto, a ferramenta desenvolvida nesta dissertação apresenta vantagens em termos de praticidade e facilidade de uso. Na solução proposta, os materiais e seus respectivos fatores de emissão encontram-se previamente estruturados no sistema, permitindo que o usuário realize o cálculo das emissões a partir da simples seleção do material e da inserção da quantidade correspondente.

Em contraste, na calculadora de Mazzutti (2023) o usuário necessita inserir manualmente tanto os materiais quanto os fatores de emissão, o que torna o processo mais demorado e

sujeito a inconsistências de entrada.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos nesta pesquisa evidenciam a relevância da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) como ferramenta metodológica aplicada ao setor de fundações profundas, com foco nas estacas raiz e nas estacas do tipo hélice contínua. Importa esclarecer que a ACV adotada possui limites de sistema “portão a portão” (gate-to-gate), restritos às etapas de execução em obra, contabilizando consumos de aço, concreto, água e combustíveis e as emissões diretamente associadas ao processo executivo. Ficam fora do escopo a fabricação dos insumos, o transporte externo até o canteiro, a fase de uso ou serviço da estrutura e o fim de vida, de modo que não se trata de uma ACV “berço ao túmulo”. Nesses termos, a análise mostrou que a execução das fundações representa impacto ambiental significativo, reforçando a necessidade de incorporar critérios de sustentabilidade já na etapa de projeto e no planejamento executivo. Cabe destacar que as obras analisadas neste estudo estão localizadas no município de Fortaleza, no estado do Ceará. As fundações avaliadas foram executadas em solos característicos da região costeira da cidade, formados predominantemente por depósitos sedimentares associados à planície litorânea, com presença de camadas arenosas e argilo-arenosas. Dessa forma, os resultados obtidos refletem as condições geotécnicas específicas desse contexto local. Portanto, as conclusões apresentadas devem ser interpretadas dentro desse recorte geográfico e geotécnico, sendo recomendável a realização de estudos adicionais em outras regiões e tipos de solo, de modo a possibilitar uma avaliação mais ampla sobre o comportamento das emissões de carbono associadas às diferentes soluções de fundação.

Ao comparar as duas obras a partir de valores normalizados, observa-se que as estacas raiz apresentaram emissões da ordem de $1,37 \text{ tCO}_2\text{e/m}^3$, enquanto o sistema de estacas hélice contínua resultou em emissões normalizadas significativamente inferiores, da ordem de $0,25 \text{ tCO}_2\text{e/m}^3$. Essa diferença evidencia que, mesmo quando consideradas em relação ao volume de material executado, as estacas hélice contínua apresentam melhor desempenho ambiental, resultado associado tanto ao menor consumo relativo de materiais quanto às características do processo executivo. Dessa forma, quando tecnicamente viável, a adoção da hélice contínua tende a representar uma alternativa com menor intensidade de emissões sob a perspectiva da pegada de carbono.

No entanto, ainda que as estacas hélice contínua apresentem menor intensidade de emissões, o estudo revelou que tanto o aço quanto o concreto continuam sendo os principais vetores de impacto ambiental em ambas as soluções. Isso reforça a importância de medidas

mitigadoras, como a utilização de concretos com adições minerais, a otimização do consumo de armaduras e a adoção de maquinário mais eficiente, capaz de reduzir o consumo de combustíveis fósseis.

Por fim, ao se considerar como parâmetro a capacidade média de sequestro de 163,14 kg de CO₂e por árvore nativa da Mata Atlântica ao longo de 20 anos, estimou-se a necessidade de aproximadamente 5.777 árvores para a neutralização das emissões da obra com estacas raiz e de cerca de 511 árvores para a obra executada com estacas hélice contínua, valores que evidenciam diferenças relevantes na magnitude dos impactos ambientais entre as tipologias analisadas. Como continuidade deste estudo, recomenda-se a ampliação do escopo de análise para outras tipologias de fundações profundas, como estacas escavadas (Strauss), Franki, pré-moldadas de concreto, metálicas e do tipo Ômega, considerando variações de traço, processos executivos e arranjos logísticos.

Nesse sentido, a pesquisa contribui para o avanço do conhecimento técnico ao fornecer subsídios para a tomada de decisão de projetistas e construtores, além de reforçar a necessidade de políticas públicas e estratégias empresariais voltadas à redução e compensação das emissões de carbono no setor da construção civil.

Além do plantio de árvores, futuras pesquisas podem explorar outras estratégias de mitigação da pegada de carbono na construção civil, como a eficiência energética, voltada para a otimização dos processos construtivos e uso de equipamentos mais eficientes; o emprego de materiais de baixo carbono, como concreto verde, aço reciclado e madeira certificada, priorizando também o uso de insumos locais para reduzir emissões de transporte; e a compensação por meio de créditos de carbono, que permite neutralizar emissões inevitáveis ao apoiar projetos de reflorestamento, energias renováveis e conservação ambiental. Essas abordagens complementam o plantio de árvores e oferecem um conjunto mais amplo de alternativas para reduzir e compensar impactos, contribuindo para práticas construtivas mais sustentáveis, sendo apresentadas aqui como sugestões de trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

- ABUSHAMA, K.; HAWKINS, W.; PELECANOS, L.; IBELL, T. Optimising the environmental impact of deep foundations. In: INSTITUTION OF STRUCTURAL ENGINEERS. **Proceedings of the 25th Young Researchers Conference**. [S.l.], 2023. p. 52.
- ALBUQUERQUE, P. J. R. d. Estacas escavadas, hélice contínua e ômega: estudo do comportamento à compressão em solo residual de diabásio, através de provas de carga instrumentadas em profundidade. **Portuguese.] D. Sc. thesis, Dept. of Structural and Geotechnical Engineering, Univ. of São Paulo**, 2001.
- ALONSO, U. R. **Exercícios de fundações**. [S.l.]: Editora Blucher, 2019.
- ANTUNES, W. R.; TAROZZO, H. Estacas tipo hélice contínua. **Fundações: teoria e prática**, v. 2, p. 345–348, 1996.
- ASADNABIZADEH, M.; MOE, E. A review of global carbon markets from kyoto to paris and beyond: The persistent failure of implementation. **Frontiers in Environmental Science**, Frontiers Media SA, v. 12, p. 1368105, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14064-3: gases de efeito estufa — Parte 3: especificação e orientação para a validação e verificação de declarações relativas a gases de efeito estufa**. Rio de Janeiro, 2007. Baseada na ISO, versão traduzida pela ABNT.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040: gestão ambiental — avaliação do ciclo de vida — princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2009. Versão corrigida em 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14044: gestão ambiental — avaliação do ciclo de vida — requisitos e orientações**. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122:2019 — Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14064-1: gases de efeito estufa — Parte 1: especificação com orientação no nível da organização para quantificação e notificação de emissões e remoções de gases de efeito estufa**. Rio de Janeiro, 2022. Revisão baseada na ISO, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14064-2: gases de efeito estufa — Parte 2: especificação e orientação a projetos para quantificação, monitoramento e elaboração de relatórios das reduções de emissões ou da melhoria das remoções de gases de efeito estufa**. Rio de Janeiro, 2022. Revisão baseada na ISO, 2019.
- BACKES, J. G.; TRAVERSO, M. Application of life cycle sustainability assessment in the construction sector: a systematic literature review. **Processes**, MDPI, v. 9, n. 7, p. 1248, 2021.
- BAO, X.; YUAN, H.; CHEN, X.; CHEN, K.; SHEN, J.; CUI, H. Ghg emission analysis of an optimal arrangement of stiffened composite pile group based on bearing capacity: A case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 440, p. 140860, 2024.

BARBHUIYA, S.; DAS, B. B.; ADAK, D. Roadmap to a net-zero carbon cement sector: Strategies, innovations and policy imperatives. **Journal of Environmental Management**, Elsevier, v. 359, p. 121052, 2024.

BEHERA, A. P.; CHAUHAN, M.; SHRIVASTAVA, G.; SINGH, P.; SHUKLA, J.; SETHI, K. C. Optimizing trade-off between time, cost, and carbon emissions in construction using nsga-iii: an integrated approach for sustainable development. **Asian Journal of Civil Engineering**, Springer, p. 1–15, 2024.

BENITES, H. S. **Regenerative Circularity for the Built Environment—A Positive Impact Framework for Urban Transitions**. Tese (Doutorado) — UNSW Sydney, 2023.

BRASIL. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (MCTI). **Projeto do MCTI quer descarbonizar construção civil por meio de edifícios com zero emissão de CO₂**. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/noticias/projeto-do-mcti-quer-descarbonizar-construcao-civil-por-meio-de-edificios-com-zero-emissao-de-co2>>.

BROWN, D. A. Practical considerations in the selection and use of continuous flight auger and drilled displacement piles. In: **Advances in Designing and Testing Deep Foundations: In Memory of Michael W. O'Neill**. [S.l.: s.n.], 2005. p. 251–261.

BROWN, D. A.; DAPP, S. D.; THOMPSON, W. R.; LAZARTE, C. A. **Design and construction of continuous flight auger piles**. [S.l.], 2007.

BROWNE, K.; DZEBO, A.; IACOBUTA, G.; ONBARGI, A. F.; SHAWOO, Z.; DOMBROWSKY, I.; FRIDAHL, M.; GOTTENHUBER, S.; PERSSON, Å. How does policy coherence shape effectiveness and inequality? implications for sustainable development and the 2030 agenda. **Sustainable Development**, Wiley Online Library, v. 31, n. 5, p. 3161–3174, 2023.

BUNGENSTAB, F. C.; BEIM, J. W. Continuous flight auger (cfa) piles—a review of the execution process and integrity evaluation by low strain test. **From fundamentals to applications in geotechnics**, IOS Press, p. 414–421, 2015.

BURCHART, D.; PRZYTUŁA, I. Carbon footprint of electric vehicles—review of methodologies and determinants. **Energies**, MDPI, v. 17, n. 22, p. 5667, 2024.

BURIOL, T. M. **Matemática Computacional com Python**. [S.l.]: Editora UFSM, 2023. v. 3.

BUYLE, M.; BRAET, J.; AUDENAERT, A. Life cycle assessment in the construction sector: A review. **Renewable and sustainable energy reviews**, Elsevier, v. 26, p. 379–388, 2013.

CAMPELLO, L. G. B.; LIMA, R. de D. O regime internacional de mudanças climáticas: uma análise da cooperação internacional solidária no acordo de paris. **Revista Argumentum-Argumentum Journal of Law**, v. 19, n. 3, p. 659–689, 2018.

CAMPOLINA, J. M.; SIGRIST, C. S. L.; MORIS, V. A. D. S. Uma revisão de literatura sobre softwares utilizados em estudos de avaliação do ciclo de vida. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 735–750, 2015.

CAMPOS, R. F. Pegada de carbono: A relação entre mudanças climáticas e hábitos insustentáveis. **Revista Geográfica de América Central**, Universidad Nacional, v. 2, p. 1–16, 2011.

CARNEIRO, V. L.; SANTOS, T. A.; BORJA, L. C. A. Integração do bim com a avaliação de ciclo de vida: Revisão sistemática da literatura. **ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, v. 20, p. 1–15, 2024.

CAVALCANTE, P. C. de S.; OLIVEIRA, W. C. de. Pesquisa acadêmica para implementação de programas em linguagem python para medidas de informação e codificação para compressão de dados: Academic research for implementation of python language programs for information measurement and coding for data compression. **Brazilian Journal of Development**, p. 56276–56283, 2022.

CHEN, L.; MSIGWA, G.; YANG, M.; OSMAN, A. I.; FAWZY, S.; ROONEY, D. W.; YAP, P.-S. Strategies to achieve a carbon neutral society: a review. **Environmental chemistry letters**, v. 20, n. 4, p. 2277–2310, 2022.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N. **Fundações por estacas: projeto geotécnico**. [S.l.]: Oficina de Textos, 2011.

COSTA, B. L. C. **Quantificação das emissões de CO₂ geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil**. 209 p. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (RJ), 2012.

CUI, M.-Z.; REN, W.-X.; YIN, Y.-G. Numerical analysis and field load testing of a suspension bridge with a root pile anchorage. In: ELSEVIER. **Structures**. [S.l.], 2021. v. 34, p. 1373–1382.

DANESHGAR, S.; AMERLINCK, Y.; AMARAL, A.; MULDER, C. D.; NISIO, A. D.; BELLANDI, G.; GORI, R.; CARETTI, C.; DUCCI, I.; REHMAN, U. An innovative model-based protocol for minimisation of greenhouse gas (ghg) emissions in wrrfs. **Chemical Engineering Journal**, Elsevier, v. 483, p. 148327, 2024.

DING, Y.; PANG, Z.; LAN, K.; YAO, Y.; PANZARASA, G.; XU, L.; RICCO, M. L.; RAMMER, D. R.; ZHU, J.; HU, M. Emerging engineered wood for building applications. **Chemical Reviews**, ACS Publications, v. 123, n. 5, p. 1843–1888, 2022.

D'HONDT, A.; OUYTSEL, C. H. B. V.; LEGAY, A. Experimental toolkit for manipulating executable packing. In: SPRINGER. **International Conference on Risks and Security of Internet and Systems**. [S.l.], 2023. p. 263–279.

FACHINELLI, P.; RELVA, S. **Desvendando a Contabilidade de Carbono: Uma análise para o setor siderúrgico**. São Paulo: [s.n.], 2025. <https://emasenergia.org/wp-content/uploads/2025/07/Relatorio_Desvendando-a-Contabilidade-de-Carbono_Paloma-Fachinelli-Stefania-Relva.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2025.

FALCONI, F.; CORRÊA, C. N.; ORLANDO, C.; SCHIMDT, C.; ANTUNES, W. R.; ALBUQUERQUE, P. d.; HACHICH, W.; NIYAMA, S. **Fundações: teoria e prática**. Editora Oficina de Textos. São Paulo, 1998.

FARIA, R. C. A. Metodologia de avaliação da emissão incorporada de gee no estoque de edifícios construídos. 2024.

FERNANDES, E. A.; LEITE, G. B. Atuação dos projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo para o desenvolvimento sustentável no brasil. **Brazilian Journal of Political Economy**, SciELO Brasil, v. 41, p. 351–371, 2021.

- FILHO, E. P. **Hélice Contínua Monitorada: Metodologia Executiva**. 2016. <<https://www.apl.eng.br/artigos/2016-METODOLOGIA-EXECUTIVA-HELICE-CONTINUA.pdf>>. Montes Claros: AP&L Geotecnia e Fundações.
- FISCHER, A.; SMIESKO, M.; SELLNER, M.; LILL, M. A. Decision making in structure-based drug discovery: visual inspection of docking results. **Journal of Medicinal Chemistry**, ACS Publications, v. 64, n. 5, p. 2489–2500, 2021.
- FRAZÃO, L. F.; VALADÃO, J.; CALEGARIO, C. L. L. Os objetivos de desenvolvimento sustentável (ods) da onu em estudos da área de gestão: Uma revisão das abordagens teóricas utilizadas. In: **Anais do Congresso de Administração, Sociedade e Inovação-CASI (Evento On-line)**. from [https://www.even3.com.br/anais/14casi/462681-OS-OBJETIVOS-DE-DESENVOLVIMENTO-SUSTENTAVEL-\(ODS\)-DA-ONU-EM-ESTUDOS-DA-AREA-DE-GESTAO%20DUMA-REVISAO-DAS-ABORDAGENS](https://www.even3.com.br/anais/14casi/462681-OS-OBJETIVOS-DE-DESENVOLVIMENTO-SUSTENTAVEL-(ODS)-DA-ONU-EM-ESTUDOS-DA-AREA-DE-GESTAO%20DUMA-REVISAO-DAS-ABORDAGENS). [S.l.: s.n.], 2022.
- FROTA, H. S.; RUVER, F. S.; FIGUEIREDO, J. M. Implementação de software desktop em python. In: SBC. **Escola Regional de Informática de Mato Grosso (ERI-MT)**. [S.l.], 2024. p. 43–47.
- GAO, X.; CHEN, X.; LU, K.; DENG, X. Monetizing environmental impacts into environmental costs during prefabricated building construction: A 5d bim-enabled analysis. **CivilEng**, MDPI, v. 6, n. 3, p. 36, 2025.
- GIAQUINTO, J. P. d. O. Uso do esg e a importância na construção civil no brasil. 2024.
- GIESEKAM, J. J. **The contribution to UK climate mitigation targets from reducing embodied carbon in the construction sector**. Tese (Doutorado) — University of Leeds, 2016.
- GREEN, J. F. Does carbon pricing reduce emissions? a review of ex-post analyses. **Environmental Research Letters**, IOP Publishing, v. 16, n. 4, p. 043004, 2021.
- GUO, P. Ten million users and ten years later: Python tutor's design guidelines for building scalable and sustainable research software in academia. In: **The 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1235–1251.
- GUPTA, P.; BAGCHI, A. Introduction to pandas. In: **Essentials of python for artificial intelligence and machine learning**. [S.l.]: Springer, 2024. p. 161–196.
- HACHICH, W.; FALCONI, F. F.; SAES, J. L.; FROTA, R. G. G.; CARVALHO, C. S.; NIYAMA, S. (Ed.). **Fundações: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: PINI; ABMS; ABEF, 1998.
- HAMIDLI, N. Introduction to ui/ux design: key concepts and principles. **Preuzeto**, v. 28, n. 3, p. 2024, 2023.
- HAMMOND, G.; JONES, C. **Inventory of Carbon and Energy (ICE)**. Bath, 2011.
- HAN, X. Energy-saving, green, and environmentally friendly construction techniques in civil engineering construction in china. **Journal of Biotech Research**, Bio Tech System, v. 17, p. 234–247, 2024.
- HUBER, E.; BACH, V.; FINKBEINER, M. A qualitative meta-analysis of carbon offset quality criteria. **Journal of Environmental Management**, Elsevier, v. 352, p. 119983, 2024.

- KELLER, D. **Programming for Corpus Linguistics with Python and Dataframes**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2024.
- KHAFFAF, I. A.; TAMIMI, A.; AHMED, V. Pathways to carbon neutrality: A review of strategies and technologies across sectors. **Energies**, MDPI, v. 17, n. 23, p. 6129, 2024.
- KHASREEN, M. M.; BANFILL, P. F.; MENZIES, G. F. Life-cycle assessment and the environmental impact of buildings: a review. **Sustainability**, Molecular Diversity Preservation International, v. 1, n. 3, p. 674–701, 2009.
- LAERA, L. H. N. **Potencialidades da cidade do Rio de Janeiro no contexto da política global do clima - um enfoque em árvores urbanas**. Dissertação (Dissertação (Doutorado)) — Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. 183 p. Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente.
- LAFORE, R.; BRODER, A.; CANNING, J. **Data Structures & Algorithms in Python**. [S.l.]: Addison-Wesley Professional, 2022.
- LAI, J. H.; LU, M. Carbon emission and maintenance cost of commercial buildings: Quantification, analysis and benchmarking. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 447, p. 141459, 2024.
- LARA, B. L. E. de. **Prevenção de resíduos da construção civil: análise dos benefícios no contexto das habitações de interesse social**. Tese (Doutorado) — [sn], 2024.
- LASS, B. Brazilian climate leadership as a national role conception: pathways from a foreign policy implementation perspective. **Brazilian Journal of International Relations**, v. 14, p. e025016.
- LEITE, T. **Estruturas de Dados: Domine as práticas essenciais em C, Java, C#, Python e JavaScript**. 1. ed. São Paulo: Casa do Código, 2023.
- LEME, F. B. P. **Sustentabilidade do ambiente construído: reflexões e avaliações da prática de escritórios de arquitetura do Rio de Janeiro e de São Paulo**. Tese (Doutorado) — PUC-Rio, 2021.
- LI, J.; TIGWELL, G. W.; SHINOHARA, K. Accessibility of high-fidelity prototyping tools. In: **Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–17.
- LI, R.; LUO, Y.; LI, Y.; ZHU, X.; ZHANG, J.; WANG, Z.; YANG, W.; LI, H. Synergistic reduction in air pollutants and health benefits under china's dual-carbon policy. **Environmental Science & Technology**, ACS Publications, v. 58, n. 22, p. 9467–9470, 2024.
- LI, X.-J.; ZHENG, Y.-d. Using lca to research carbon footprint for precast concrete piles during the building construction stage: A china study. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 245, p. 118754, 2020.
- LINDQUIST, J. M.; SULEWSKI, C. A. Microsoft excel: The universal tool of analysis. In: **Handbook of Military and Defense Operations Research**. [S.l.]: Chapman and Hall/CRC, 2024. p. 21–72.

LIU, Y.; DING, Y.; XU, Z.; ZHAO, X. Global carbon management: Current status and future trends. In: IEEE. **2024 IEEE 8th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)**. [S.l.], 2024. p. 4039–4046.

LOURENÇO, F.; SOUZA, J. N. V. de; LANNA, P. H. G.; FERREIRA, P. F.; ROSA, D. d. G. M. Parâmetros para escolha de fundações profundas. **Caderno Pedagógico**, v. 20, n. 5, p. 1286–1326, 2023.

LUO, W.; SANDANAYAKE, M.; ZHANG, G. Direct and indirect carbon emissions in foundation construction—two case studies of driven precast and cast-in-situ piles. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 211, p. 1517–1526, 2019.

MACIEL, M. A. D.; JUNIOR, C. B.; ANDREAZZA, M. Levantamento de emissões de gases de efeito estufa no transporte de materiais de uma construção civil em maringá/pr. **ENCONTRO INTERNACIONAL DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA UNICESUMAR**, v. 9, 2015.

MARTÍNEZ, M. L. V.; BRITO, Y. C.; BALCÁZAR, M. M. C. Análisis legal de la conferencia de estocolmo y la constitución política de colombia 1991 en la conservación del río guatapurí (valledupar 2024). **Revista CIES Escolme**, v. 16, n. 1, p. 47–57, 2025.

MAWLOOD-YUNIS, A.-R. User interface essential classes, layouts, styles, themes, and dimensions. In: **Android for Java Programmers**. [S.l.]: Springer, 2022. p. 227–278.

MAZZUTTI, E. A. **Calculadora de emissão de carbono para obras de fundações: construção e validação**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2023.

MCALINDEN, B. Pas 2080: world first specification for cutting carbon dioxide emissions in infrastructure. In: THOMAS TELFORD LTD. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering**. [S.l.], 2016. v. 169, n. 3, p. 99–99.

MEHTA, L.; LEACH, M.; SCOONES, I. Environmental governance in an uncertain world. **IDS bulletin**, v. 56, n. 1A, 2025.

MENDONÇA, J. D. Araujo de. The importance of environmental governance in the carbon market. **Environmental & Social Management Journal/Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 19, n. 7, 2025.

MONTEIRO, F. F.; MOURA, A. S.; AGUIAR, M. F. P. de. An alternative approach to the executive control of root piles. **Soils and Rocks**, v. 42, n. 3, p. 289–299, September–December 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/63776>>.

MOORE, A. **Python GUI Programming with Tkinter**. [S.l.]: Packt Publishing, 2021.

NASCIMENTO, G. S. S. Meio ambiente, cultura e mídia: uma análise do posicionamento discursivo da folha de são paulo sobre as cops 21, 26 e 27. **Folha de São Paulo**, Universidade Federal da Bahia, 2024.

NAVAEI, T. N.; BLAINEY, S.; PRESTON, J.; POWRIE, W. Carbon footprinting of railway infrastructure: a standardized, consistent data collection method. **Carbon Management**, v. 15, n. 1, p. 2368839, 2024.

NETO, J. V.; FILHO, J. R. de F. Sustainability in the civil construction industry: an exploratory study of life cycle analysis methods. **International journal of environmental technology and management**, Inderscience Publishers Ltd, v. 16, n. 5-6, p. 420–436, 2013.

OLIVEIRA, A. S. **Análise ambiental da viabilidade de seleção de produtos da construção civil através da ACV e do software BEES 3.0**. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2007.

OYEWALE, K.; BASSEY, K. E. Climate action and social equity: mitigation strategies and carbon credits. **World Journal of Advanced Research and Reviews**, v. 24, n. 2, p. 187–201, 2024.

PEREIRA, S. S.; COSTA, A. N. da; DIAS, M. F. de S.; ASSIS, V. dos S.; SANTOS, R. G. dos; DALL’OCA, G. S.; SANTOS, R. G. dos; SERAFINI, R. Inovações na engenharia civil: uma análise das novas tendências em materiais de construção. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 12, p. e11169–e11169, 2024.

PINTO, C. de S. **Curso básico de Mecânica dos Solos**. [S.l.]: Oficina de Textos, 2016.

POMPONI, F.; MONCASTER, A. Embodied carbon mitigation and reduction in the built environment—what does the evidence say? **Journal of environmental management**, Elsevier, v. 181, p. 687–700, 2016.

PRESURA, E.; ROBESCU, L. D. Energy use and carbon footprint for potable water and wastewater treatment. In: **Proceedings of the International Conference on Business Excellence**. [S.l.: s.n.], 2017. v. 11, n. 1, p. 191–198.

PROGRAMA BRASILEIRO GHG PROTOCOL. **Ferramenta GHG Protocol Versão 2023.0.3**. 2023.

PUJADAS-GISPert, E.; SANJUAN-DELMÁS, D.; FUENTE, A. de la; MOONEN, S. F.; JOSA, A. Environmental analysis of concrete deep foundations: Influence of prefabrication, concrete strength, and design codes. **Journal of cleaner production**, Elsevier, v. 244, p. 118751, 2020.

RAGAVAN, S. S.; SARKAR, A.; GORDON, A. D. Spreadsheet comprehension: Guesswork, giving up and going back to the author. In: **Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–21.

SAMARA, F.; IBRAHIM, S.; YOUSUF, M. E.; ARMOUR, R. Carbon footprint at a united arab emirates university: Ghg protocol. **Sustainability**, MDPI, v. 14, n. 5, p. 2522, 2022.

SANDANAYAKE, M.; ZHANG, G.; SETUNGE, S. Environmental emissions at foundation construction stage of buildings—two case studies. **Building and Environment**, Elsevier, v. 95, p. 189–198, 2016.

SANDANAYAKE, M.; ZHANG, G.; SETUNGE, S.; LI, C.-Q.; FANG, J. Models and method for estimation and comparison of direct emissions in building construction in australia and a case study. **Energy and Buildings**, Elsevier, v. 126, p. 128–138, 2016.

SANDANAYAKE, M.; ZHANG, G.; SETUNGE, S.; LUO, W.; LI, C.-Q. Estimation and comparison of environmental emissions and impacts at foundation and structure construction stages of a building—a case study. **Journal of cleaner production**, Elsevier, v. 151, p. 319–329, 2017.

SANDOVAL, B.; CUNHA, R. Review on carbon footprint in deep foundations: Case study for helical piles in Brasília, DF. In: **Geotechnical Engineering Challenges to Meet Current and Emerging Needs of Society**. [S.l.]: CRC Press, 2024. p. 3297–3302.

SANTOS, L. dos; ARMANI, F. A. S.; MOREIRA, V. S. Extensão universitária: inventário de gases de efeito estufa da secretaria municipal do meio ambiente de Guaratuba, PR. **Extensão em Foco**, n. 32, 2024.

SATRIA, H.; SYAFII, S.; SALAM, R.; MUNGKIN, M.; YANDI, W. Design visual studio based GUI applications on-grid connected rooftop photovoltaic measurement. **TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)**, v. 20, n. 4, p. 914–921, 2022.

SCARANO, F. R.; PADGURSCHI, M. d. C. G.; FREIRE, L. M.; AGUIAR, A. C. F.; CARNEIRO, B. L. R.; PIRES, A. P. F. Para além dos objetivos do desenvolvimento sustentável: desafios para o Brasil. **Bio Diverso**, v. 1, n. 1, 2021.

SHABANI, A. A review of graphical user interfaces of OpenSees software framework. **Frontiers in Built Environment**, Frontiers Media SA, v. 9, p. 1233116, 2023.

SHIMASAKI, R.; PRADO, M. E. B. B. O ensino da programação e o desenvolvimento do pensamento lógico: uma revisão sistemática de literatura. **Revista de Ensino, Educação e Ciências Humanas**, v. 22, n. 2, p. 197–205, 2021.

SHIMIZU, Y.; DEJIMA, S.; TOYOSADA, K. The CO₂ emission factor of water in Japan. **Water**, MDPI, v. 4, n. 4, p. 759–769, 2012.

SHREEMATHI, M.; SENTHILKUMAR, B.; SUJITHRA, S. M.; PRAISOODI, A.; RITHIKA, S. Mastering geospatial analysis with Python: Understanding geopandas, GDAL, Fiona, Matplotlib, data integration, and GIS tools. In: **Ethics, Machine Learning, and Python in Geospatial Analysis**. [S.l.]: IGI Global Scientific Publishing, 2024. p. 120–149.

SILVA, A. A. da. Aço e multinacionais. **Revista de Administração Pública**, v. 10, n. 1, p. 116–a, 1976.

SILVA, J. K. d. Análise comparativa de fundações profundas: estaca hélice contínua e estaca raiz. **Revista Interdisciplinar Pensamento Científico**, v. 6, n. 3, 2020.

SILVA, J. K. da. Análise comparativa de fundações profundas: estaca hélice contínua e estaca raiz. **Revista Interdisciplinar Pensamento Científico**, v. 6, n. 3, 2020.

SILVEIRA, L. L.; BENEDICTO, S. C. D.; SILVA, L. H. V. da; BITTENCOURT, J. J. Sustentabilidade empresarial estratégica: estudo de fatores críticos de sucesso. **Revista de Administração da UFSM**, v. 15, p. 760–780, 2022.

SINDUSCON SÃO PAULO. **Guia Metodológico para Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa na Construção Civil – Setor Edificações**. São Paulo, 2022.

STACHERA, T. J.; CASAGRANDE, E. Avaliação de emissões de co₂ na construção civil: um estudo de caso da habitação de interesse social no paraná. **XXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**. Rio de Janeiro, RJ, 2008.

STUCCHI, F. R.; CEPOLLINA, M.; MOTA, N. M. B.; ROECKER, R. B. Estacas raiz: surgimento e desenvolvimento da estaca raiz (pali radice). **Fundações & Obras Geotécnicas**, v. 5, n. 48, p. 74–86, 2014.

SULIANTA, F. **UX UI Design**. [S.l.]: Feri Sulianta, 2025.

SUNDARAMOORTHY, S.; KAMATH, D.; NIMBALKAR, S. U.; PRICE, C.; WENNING, T.; CRESKO, J. Energy efficiency’s role in industrial decarbonization. **Amplify**, Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Oak Ridge, TN (United States), v. 36, n. 11, 2023.

SURYAN, L.; DAOUTIS, G.; GIRRBACH, L. Cut carbon, cut cost-feasibility of applying pas 2080. Qatar Univesrity Press, 2020.

SZETELA, B.; MAJEWSKA, A.; JAMROZ, P.; DJALILOV, B.; SALAHODJAEV, R. **Renewable energy and CO₂ emissions in top natural resource rents depending countries: the role of governance**. **Front Energy Res** 10. 2022.

TAN, Y.; WANG, D. Characteristics of a large-scale deep foundation pit excavated by the central-island technique in shanghai soft clay. i: Bottom-up construction of the central cylindrical shaft. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 139, n. 11, p. 1875–1893, 2013.

TANENBAUM, A. S.; BOS, H. **Sistemas operacionais modernos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2024.

TEOH, T. T.; RONG, Z. Python for data analysis. In: **Artificial Intelligence with Python**. [S.l.]: Springer, 2022. p. 107–122.

TOSCANO, G. U.; HUBEDA, M. da S.; OLIVEIRA, R. H. de; LAZARO, A. A. Hélice contínua: Estudo de caso da monitoração eletr nica com as características dos solos. **Revista Mackenzie de Engenharia e Computação**, v. 22, n. 1, p. 173–196, 2022.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US EPA). **Development of Particulate and Hazardous Emission Factors for Electric Arc Welding (AP-42, Section 12.19) – Revised Final Report**. Research Triangle Park, NC, 1994.

VELOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.  nico.

VERDIANI, V. B.; YAMAJI, F. M.; LIMA, L.; BELINI, G. Visão geral sobre o processo de coprocessamento na indústria do cimento no brasil. **Ambiente Construido**, SciELO Brasil, v. 25, p. e140295, 2025.

VIEIRA, V. D. B. P.; FIGUEIREDO, A. D. D.; CIRILO, F.; VERDIANI, V. B.; LIMA, L. M. D. Analysis of co emissions and waste elimination capacity of different recycling strategies applied in ready-mixed concrete plants. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 15, n. 6, 2022.

VIRGENS, T. A. N. das; ANDRADE, J. C. S.; HIDALGO, S. L. Pegada carbono de órgãos públicos: Guia de cálculo baseado na aplicação do bookfeel no ministério público do estado da bahia/brasil. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, Centro Universitário da FEI, Revista RGSA, v. 14, n. 1, p. 74–92, 2020.

WALENTA, J. The making of the corporate carbon footprint: the politics behind emission scoping. **Journal of Cultural Economy**, Taylor & Francis, v. 14, n. 5, p. 533–548, 2021.

WANG, H.; WANG, Y.; ZHAO, L.; WANG, W.; LUO, Z.; WANG, Z.; LUO, J.; LV, Y. Integrating bim and machine learning to predict carbon emissions under foundation materialization stage: Case study of china's 35 public buildings. **Frontiers of Architectural Research**, Elsevier, 2024.

WEST, T. A.; WUNDER, S.; SILLS, E. O.; BÖRNER, J.; RIFAI, S. W.; NEIDERMEIER, A. N.; FREY, G. P.; KONTOLEON, A. Action needed to make carbon offsets from forest conservation work for climate change mitigation. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 381, n. 6660, p. 873–877, 2023.

WINTERGREEN, J.; DELANEY, T. Iso 14064, international standard for ghg emissions inventories and verification. In: **16th annual international emissions inventory conference**, Raleigh, NC. [S.l.: s.n.], 2007.

XIE, Z.; HAN, B.; SUN, Y.; SU, B.-L.; YANG, J.; BAO, X.; HE, M. **Green carbon science for carbon neutrality**. [S.l.]: Oxford University Press, 2023. nwad225 p.

ZELLI, F. Groundhog day at the 2024 united nations biodiversity conference: What cop 16 can teach us for reforming environmental summits. **Earth System Governance**, Elsevier, v. 25, p. 100259, 2025.

ZHANG, X.; WANG, F. Assessment of embodied carbon emissions for building construction in china: Comparative case studies using alternative methods. **Energy and Buildings**, Elsevier, v. 130, p. 330–340, 2016.

ZHU, L.; LI, Z.; YANG, X.; ZHANG, Y.; LI, H. Forecast of transportation co2 emissions in shanghai under multiple scenarios. **Sustainability**, MDPI, v. 14, n. 20, p. 13650, 2022.