

Análise da Emissão de Carbono Decorrente da Execução de Estacas Raiz em Fortaleza-CE

Thaís Silva de Araújo

Engenheira Ambiental e Sanitarista, IFCE, Fortaleza, Brasil, thais.araujo05@aluno.ifce.edu.br

Marcos Fábio Porto de Aguiar

Engenheiro Civil, IFCE, Fortaleza, Brasil, marcosporto@ifce.edu.br

RESUMO: Este trabalho teve como objetivo quantificar as emissões de carbono associadas à execução de estacas raiz em uma obra real localizada em Fortaleza-CE, utilizando a abordagem de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) do tipo “portão a portão”. A metodologia consistiu no desenvolvimento de uma calculadora, incorporando fatores de emissão de carbono para os principais insumos utilizados na execução das fundações, tais como aço, cimento, areia, água e óleo diesel. A ferramenta foi validada a partir de dados reais referentes à execução de 224 estacas raiz, com diâmetro de 400 mm e profundidade média entre 24 e 25 m, em um edifício residencial de grande porte. Os resultados indicaram que o aço foi o principal responsável pelas emissões totais de CO₂ equivalente, seguido pelo elevado consumo de água, enquanto cimento e areia apresentaram contribuições secundárias. Com base nos valores obtidos, estimou-se a necessidade de aproximadamente 5.777 árvores nativas da Mata Atlântica para a neutralização das emissões ao longo de um período de 20 anos. Conclui-se que a aplicação da ACV, aliada ao uso de ferramentas computacionais, constitui um instrumento eficaz para a quantificação da pegada de carbono em fundações profundas e para o suporte a estratégias de mitigação ambiental, como o plantio de árvores.

PALAVRAS-CHAVE: Sustentabilidade; Emissão de carbono; Estaca raiz; Neutralização.

ABSTRACT: This study aimed to quantify the carbon emissions associated with the execution of root piles in a real construction project located in Fortaleza, Ceará, Brazil, using a “gate-to-gate” Life Cycle Assessment (LCA) approach. The methodology consisted of developing a computational calculator incorporating carbon emission factors for the main inputs used in foundation execution, such as steel, cement, sand, water, and diesel oil. The tool was validated using real data from the execution of 224 root piles, with a diameter of 400 mm and an average depth ranging from 24 to 25 m, in a large-scale residential building. The results indicated that steel was the main contributor to total CO₂-equivalent emissions, followed by high water consumption, while cement and sand presented secondary contributions. Based on the obtained values, the need for approximately 5,777 native Atlantic Forest trees was estimated to neutralize the emissions over a 20-year period. It is concluded that the application of LCA, combined with computational tools, constitutes an effective instrument for quantifying the carbon footprint of deep foundations and for supporting environmental mitigation strategies, such as tree planting.

KEYWORDS: Sustainability; Carbon emissions; Root pile; Neutralization.

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é responsável por cerca de 40% das emissões globais de CO₂, o que evidencia a necessidade de práticas mais sustentáveis (Ding *et al.*, 2022; Behera *et al.*, 2024). Nas fundações, destaca-se a estaca raiz, moldada in loco, cuja execução varia conforme o solo, influenciando o consumo de materiais e o dimensionamento (Silva, 2020). A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é essencial para mensurar os impactos ambientais dessa etapa, considerando desde a produção dos insumos até a sua aplicação em campo (Lai; Lu, 2024). Materiais como aço e cimento, aliados ao uso de maquinário, aumentam a pegada de carbono (Lara, 2024), enquanto fatores regionais como logística e origem dos materiais também influenciam as emissões

(Giaquinto, 2024). Para o cálculo das emissões, foram utilizados fatores de emissão conforme Zhang e Wang (2016), conforme a Equação 1.

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

Onde:

n: número de tipos de materiais ou atividades;

A_i : quantidade do material ou atividade do tipo i;

FE_i : fator de emissão associado ao material ou atividade do tipo i.

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).

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 (CO_2) da atmosfera durante o processo de fotossíntese, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas (Santos; Armani; Moreira, 2024).

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 CO_2 equivalente (tCO_2e), considerando todas as fases do ciclo de vida, desde a produção de materiais até a construção e operação.

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 CO_2 equivalente ao longo dos seus primeiros 20 anos de crescimento, o que corresponde a uma taxa média anual aproximada de 39 8,16 kg de CO_2 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). Com base nesse valor, o número de árvores necessárias para neutralizar as emissões pode ser estimado por meio da seguinte equação:

$$N_{\text{árvores}} = \frac{C_{\text{neutralizar}}}{S_{\text{média}}} \quad (2)$$

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 CO_2), e $C_{\text{neutralizar}}$ é a quantidade de carbono a ser neutralizada.

Dessa forma, a presente pesquisa se justifica pela necessidade de abordar lacunas científicas e práticas relacionadas às emissões de carbono na execução das estacas raiz, contribuindo para a redução do impacto ambiental da construção civil.

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia consistiu no desenvolvimento de uma calculadora de emissões de carbono em Python aplicada à execução de estacas raiz, envolvendo o levantamento e organização dos fatores de emissão, construção do software e criação de interface gráfica com a biblioteca Tkinter, Pandas para tratamento de dados e Matplotlib para visualização em escala logarítmica (Cavalcante e Oliveira, 2022). O cálculo de emissões foi implementado de forma simples e eficiente, por meio da multiplicação entre os fatores de emissão previamente definidos para cada material e as quantidades. Esses fatores, organizados em estruturas do tipo

dicionário, permitem rápida associação entre material e valor de emissão em kg de CO₂ por unidade. A validação ocorreu com dados reais de uma obra em Fortaleza-CE, seguindo a abordagem de ACV de portão a portão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A pesquisa utilizou uma ferramenta computacional desenvolvida em Python, com base em uma obra real em Fortaleza-CE, é um edifício residencial de grande porte, que terá 25.970 m² de área construída, 46 andares e 171 m de altura, conforme localização ilustrada na Figura 1.

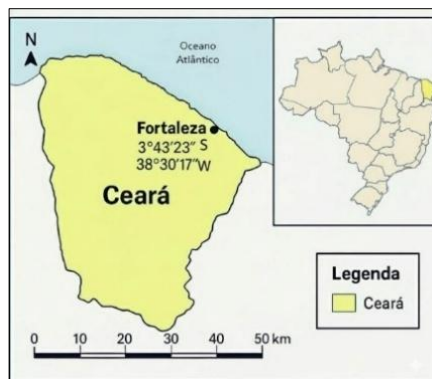


Figura 1 - Localização da obra em estudo.

A interface gráfica da calculadora (Figura 2) permite a inserção dos parâmetros de entrada, além da seleção dos materiais utilizados na obra e das respectivas quantidades, expressas em toneladas ou litros.

Calculadora de Carbono da Thaís Silva de Araújo

Entrada:

Material:

Quantidade:

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

Figura 2 - Interface gráfica da calculadora.

Seguindo a abordagem “portão a portão” da ACV, foram realizadas visitas técnicas e levantamentos em campo, a fim de identificar os principais materiais empregados na obra. A análise das emissões de carbono na execução de 224 estacas raiz, com diâmetro de 400 mm e profundidade entre 24 e 25 m, realizada entre julho de 2024 e abril de 2025, evidenciou o impacto dos insumos utilizados. Foram identificadas contribuições significativas de materiais como aço, cimento, areia, água e óleo diesel. A Tabela 1 apresenta os quantitativos associados à execução da obra, calculados automaticamente pela ferramenta desenvolvida.

Tabela 1: 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

A análise do gráfico de barras em escala logarítmica (Figura 3) evidencia 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, reflexo de sua produção altamente intensiva em energia. A água surge como o segundo maior contribuinte, devido ao grande volume consumido no processo construtivo. A areia e cimento, embora essenciais, apresentam impacto relativamente menor em comparação ao aço. Esses resultados corroboram Sanquetta *et al.* (2013) ao evidenciar que a avaliação da pegada de carbono deve considerar simultaneamente quantidade e fator de emissão dos insumos.

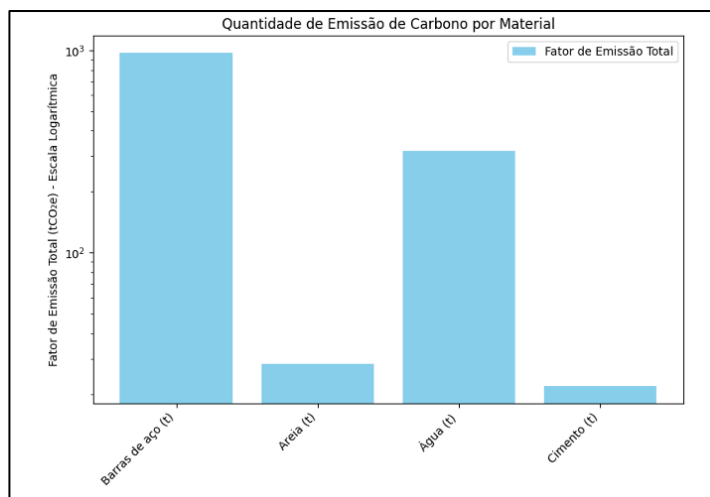


Figura 3: Emissões de CO₂ e associadas aos insumos utilizados na execução das estacas raiz.

Com base na abordagem adotada de neutralização do carbono, essas emissões corresponderiam à necessidade de plantio aproximado de 5.777 árvores nativas da Mata Atlântica, para que seja alcançada a neutralização completa ao longo de um período de 20 anos, Tabela 2, 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.

Tabela 2– Emissões de carbono e estimativa de compensação por meio de árvores.

Tipo de fundação	Emissões (tCO ₂ e)	Árvores necessárias (20 anos)
Estacas raiz	942,14	5.777

CONCLUSÃO

A aplicação da ACV, na abordagem de portão a portão, associada ao uso da calculadora desenvolvida em Python, possibilitou a quantificação das emissões de carbono decorrentes da execução das 224 estacas raiz. Os resultados demonstraram que o aço foi o principal responsável pelo impacto total, seguido pelo grande consumo de água, enquanto cimento e areia apresentaram contribuições secundárias. Esses resultados evidenciam a necessidade de estratégias de mitigação ambiental, considerando práticas de neutralização como o reflorestamento ou a aquisição de créditos de carbono a fim de reduzir a pegada de carbono.

A partir da quantificação das emissões, foi possível estimar a compensação ambiental necessária por meio da neutralização de carbono, destacando-se o plantio de árvores nativas da Mata Atlântica como uma alternativa viável e ambientalmente adequada. Os resultados indicaram a necessidade de aproximadamente 5.777 árvores para neutralizar as emissões geradas, considerando um horizonte de 20 anos de sequestro de carbono, reforçando o papel do reflorestamento como estratégia eficaz de mitigação dos impactos ambientais associados às fundações profundas.

Dessa forma, conclui-se que a integração entre ferramentas computacionais, Avaliação do Ciclo de Vida e estratégias de neutralização, como o plantio de árvores, representa um importante avanço para a incorporação de práticas sustentáveis na engenharia geotécnica, contribuindo para a redução da pegada de carbono da construção civil e para o alinhamento do setor com as metas globais de mitigação das mudanças climáticas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) e à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pelo apoio financeiro e incentivo à pesquisa.

REFERÊNCIAS

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.

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.

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. *Brazilian Journal of Development*, p. 56276–56283, 2022.

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

GIAQUINTO, José Paulo de Oliveira. *Uso do ESG e a importância na construção civil no Brasil*. Revista Acadêmica ESAMC – Marketing Pessoal, Edição 3, p. 36–42, São Paulo: ESAMC, 2024.

Instituto Totum, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP), & Fundação SOS Mata Atlântica. (2013). A tree from the Atlantic Forest can remove 163 kg of CO₂ from the atmosphere. *Cellulose Online*. Retrieved March 24, 2013.

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.

LAI, J. H.; LU, M. Carbon emission and maintenance cost of commercial buildings: Quantification, analysis and benchmarking. *Journal of Cleaner Production*, v. 447, p. 141459, 2024.

LARA, Beatriz Leão Evangelista de. *Prevenção de resíduos da construção civil: análise dos benefícios no contexto das habitações de interesse social*. 2024. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia, Campinas, 2024

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.

SANQUETTA, C. R.; FLIZIKOWSKI, L. C.; CORTE, A. P.; MOGNON, F.; MAAS, G. Estimativa das emissões de gases de efeito estufa em uma obra de construção civil com a metodologia GHG Protocol. *Enciclopédia Biosfera*, v. 9, n. 16, 2013.

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.

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

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