

## Avaliação do Ciclo de Vida na Análise das Emissões de Carbono Decorrentes da Execução de Estacas Hélice Contínua em Fortaleza-CE

Thaís Silva de Araújo  
Mestranda, IFCE, Fortaleza, Brasil, [thais.araujo05@aluno.ifce.edu.br](mailto:thais.araujo05@aluno.ifce.edu.br)

Marcos Fábio Porto de Aguiar  
Engenheiro Civil, IFCE, Fortaleza, Brasil, [marcosporto@ifce.edu.br](mailto:marcosporto@ifce.edu.br)

Luiz Kauã Grangeiro Barata  
Graduando, IFCE, Fortaleza, Brasil, [luiz.kaua09@aluno.ifce.edu.br](mailto:luiz.kaua09@aluno.ifce.edu.br)

Marina Albuquerque Porto de Aguiar  
Graduanda, IFCE, Fortaleza, Brasil, [marina.porto07@aluno.ifce.edu.br](mailto:marina.porto07@aluno.ifce.edu.br)

**RESUMO:** O setor da construção civil é um dos maiores emissores de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), responsável por cerca de 40% das emissões globais. Este estudo quantifica as emissões geradas na execução de estacas hélice contínua em uma obra localizada em Fortaleza, Ceará, utilizando a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para analisar os impactos ambientais. Como parte da pesquisa, foi desenvolvida uma calculadora de emissões em Python, permitindo estimativas precisas ao considerar variáveis como materiais e combustíveis fósseis. Além disso, a análise incluirá um estudo de compensação de carbono para determinar o plantio necessário para neutralizar as emissões das fundações. Os resultados buscam promover práticas sustentáveis no setor, oferecendo métodos eficazes para mensuração e estratégias de mitigação do impacto ambiental. Com isso, a pesquisa visa contribuir para a redução da pegada de carbono da construção civil e incentivar o desenvolvimento de soluções mais ecológicas para fundações estruturais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Avaliação do Ciclo de Vida; Fundações profundas; Estacas hélice contínua; Emissões de carbono.

**ABSTRACT:** The construction industry is one of the largest emitters of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), accounting for approximately 40% of global emissions. This study quantifies the emissions generated during the execution of continuous flight auger piles in a construction project located in Fortaleza, Ceará, using the Life Cycle Assessment (LCA) methodology to analyze environmental impacts. As part of the research, a carbon emissions calculator was developed in Python, allowing precise estimates by considering variables such as materials and fossil fuels. Additionally, the analysis will include a carbon offset study to determine the necessary tree planting to neutralize foundation emissions. The results aim to promote sustainable practices in the sector by providing effective measurement methods and mitigation strategies for environmental impact. Thus, the research seeks to contribute to reducing the construction industry's carbon footprint and encourage the development of more eco-friendly solutions for structural foundations.

**KEYWORDS:** Life Cycle Assessment, Deep foundations; Continuous Flight Auger Piles; Carbon Emissions.



## 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 (CO<sub>2</sub>) e por um expressivo uso de energia (Ding *et al.*, 2022). Esse 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.

No contexto brasileiro, o uso de fundações profundas, as estacas hélice contínua monitorada (HCM), é uma prática consolidada, especialmente em terrenos com características desafiadoras (Silva, 2020). As estacas HCM são executadas por meio de perfuração contínua e concretagem simultânea, técnica reconhecida 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).

A avaliação do ciclo de vida (ACV) é fundamental para entender e quantificar as emissões de carbono associadas às edificações (Lai; Lu, 2024). Desde a extração de matérias-primas até a produção, transporte, construção, uso e descarte, cada etapa contribui para a pegada de carbono da obra (Faria, 2024). As fundações representam uma etapa crítica nesse ciclo, pois envolvem materiais com alto índice de carbono, como cimento e aço, além de processos mecanizados que demandam energia (Lara, 2024). No Brasil, as condições locais, como a origem dos materiais e a eficiência dos maquinários, influenciam diretamente as emissões geradas (Giaquinto, 2024).

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

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A avaliação do ciclo de vida (ACV) é uma metodologia reconhecida internacionalmente, padronizada pelas normas ISO 14040 (ISO, 2006) e ISO 14044 (ISO, 2006), que tem como objetivo quantificar os impactos ambientais associados a um produto, processo ou serviço ao longo de todas as suas etapas — desde a extração das matérias-primas até a disposição final dos resíduos. No setor da construção civil, a ACV tem ganhado destaque como uma ferramenta estratégica para a tomada de decisões sustentáveis, pois permite identificar os pontos críticos de emissão de gases de efeito estufa (GEE) e o uso intensivo de recursos naturais (Lai; Lu, 2024).

A aplicação da ACV em obras civis proporciona uma abordagem holística, abrangendo desde os impactos de materiais como aço, cimento e combustíveis fósseis até os processos de transporte, instalação e operação de equipamentos (Figura 1). Estudos como o de Faria (2024) indicam que os estágios iniciais da construção, especialmente os de fundação, concentram os maiores índices de emissões, configurando-se como alvos prioritários para estratégias de mitigação.

De acordo com Sanquetta *et al.* (2013), a compensação de carbono representa uma alternativa viável para neutralizar os impactos inevitáveis da construção civil. Entre as estratégias mais acessíveis está o plantio de árvores nativas, capaz de promover a captura direta de CO<sub>2</sub> da atmosfera. A estimativa da quantidade de árvores necessária para compensar uma determinada emissão de carbono torna-se, assim, uma ferramenta essencial para o planejamento ambiental dos empreendimentos, permitindo metas de compensação mais quantitativas, precisas e eficazes.





Figura 1. Fases da avaliação do ciclo de vida na construção civil.

Segundo Silva *et al.* (2020), a ACV das estacas tipo hélice contínua requer o entendimento do seu processo executivo, que ocorre em três etapas principais: perfuração, concretagem e colocação da armadura, conforme ilustrado na Figura 2.

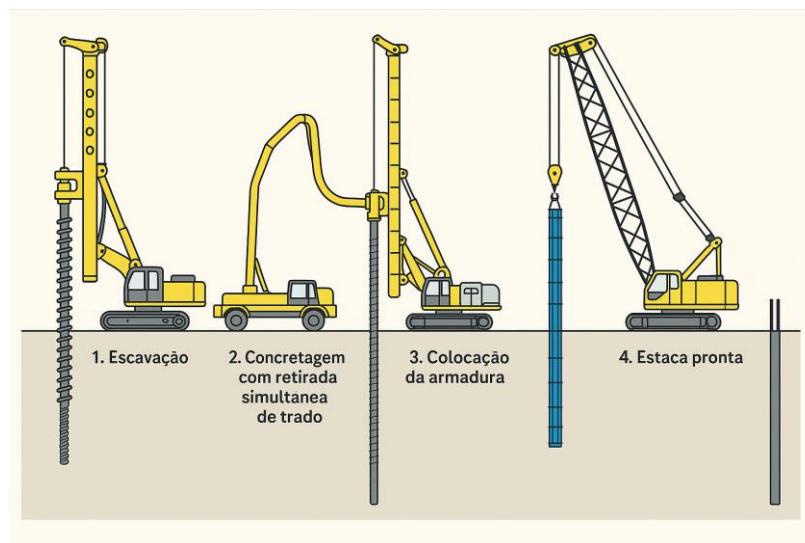


Figura 2. Etapas de execução da estaca hélice contínua monitorada (Fonte: adaptado Silva *et al.*, 2020).

Na primeira etapa, a hélice é cravada no solo por rotação, utilizando torque suficiente para vencer a resistência do terreno até atingir a profundidade projetada. O solo é removido pela hélice espiral e pelo tubo central, equipado com dentes adaptáveis à dureza do material perfurado. Uma tampa metálica provisória, posicionada na extremidade da haste, impede a entrada de solo e água durante a perfuração, sendo expulsa posteriormente pela pressão do concreto.

A perfuração deve ser cuidadosamente monitorada para evitar o desconfinamento excessivo do solo, garantindo a estabilidade da estaca. Na etapa de concretagem, o concreto é bombeado pelo interior da haste tubular, empurrando a tampa metálica. A hélice é então retirada sem rotação, de forma contínua, para preservar a integridade das paredes da estaca.



Na última etapa, a armadura é inserida imediatamente após a concretagem. A introdução pode ser feita por gravidade, compressão com pilão ou vibração — sendo esta última a mais recomendada em normas internacionais. A rigidez da armadura é assegurada por barras longitudinais e estribos soldados, evitando deformações durante a instalação. Para estacas mais profundas, é necessário o uso de pilão ou vibrador, devendo a inserção ocorrer o mais rapidamente possível para garantir boa aderência ao concreto ainda fresco (Silveira *et al.*, 2023).

Os fatores de emissão são indicadores da quantidade de gases de efeito estufa (GEE) liberada por unidade de produção de um material ou processo, o qual podem variar conforme características. Segundo Zhang e Wang (2016) para o cálculo das emissões de carbono e neutralização do carbono utilizou-se as seguintes equações 1 e 2.

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

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  $i$ .

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

Onde:

$N_{\text{árvores}}$ : número de árvores necessárias;

$S_{\text{média}}$ : média de sequestro de carbono por árvore por ano [ $\text{kg CO}_2$ ];

$C_{\text{neutralizar}}$ : quantidade de carbono a ser neutralizada [ $\text{kg CO}_2$ ].

A metodologia adotada neste estudo teve como objetivo o desenvolvimento de uma calculadora de emissões de carbono, implementada em Python, com aplicação voltada para a execução de fundações profundas utilizando estacas do tipo hélice contínua. O processo metodológico foi estruturado em cinco etapas principais: (a) levantamento de dados, (b) estruturação da base de dados, (c) desenvolvimento do software, (d) aplicação e validação da ferramenta e (e) análise dos resultados.

Na primeira etapa, foram coletadas informações sobre os fatores de emissão de carbono associados aos materiais e processos da construção civil, com base em fontes confiáveis, como artigos científicos e bancos de dados internacionais. Os materiais e insumos identificados foram organizados em quatro categorias principais: materiais nacionais, materiais internacionais, transporte nacional e transporte internacional.

A base de dados foi estruturada por meio de dicionários no código Python, nos quais foram armazenados os fatores de emissão correspondentes a cada categoria. A calculadora foi desenvolvida com funcionalidades que permitem o cálculo automatizado das emissões, utilizando a biblioteca Pandas para o tratamento e manipulação de dados, e a “Matplotlib” para a geração de gráficos. A interface gráfica foi criada com a biblioteca “Tkinter”, permitindo a inserção de parâmetros personalizados pelo usuário e a exportação dos resultados em formato “.xlsx”, o que facilita a análise externa. Para melhor representar as variações nos fatores de emissão, foi adotada a escala logarítmica na visualização gráfica dos dados.

A ferramenta foi validada com base em dados reais de uma obra localizada na cidade de Fortaleza, estado do Ceará, região Nordeste do Brasil, conforme ilustrado pela Figura 3, que utilizou fundações com estacas hélice contínua. Os resultados obtidos pela calculadora foram comparados com estimativas manuais e métodos convencionais de quantificação. A análise seguiu a abordagem “portão a portão” da avaliação do ciclo



de vida, que considera todas as etapas do processo produtivo até o momento em que o produto deixa a fábrica, sem incluir sua origem, uso ou descarte final.

A partir dos resultados, foram propostas estratégias de mitigação das emissões de carbono, além do cálculo da quantidade de árvores necessárias para neutralizar o total de carbono emitido. Entre as principais limitações da ferramenta, destacam-se a dependência da precisão dos fatores de emissão adotados e a necessidade de atualização contínua da base de dados, a fim de garantir a confiabilidade e atualidade dos cálculos realizados.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A pesquisa utilizou uma ferramenta computacional desenvolvida em Python, com base em uma obra real em Fortaleza-CE, conforme localização ilustrada na Figura 3. A aplicação da ferramenta permitiu uma estimativa precisa das emissões de carbono associadas à execução das estacas hélice contínua.

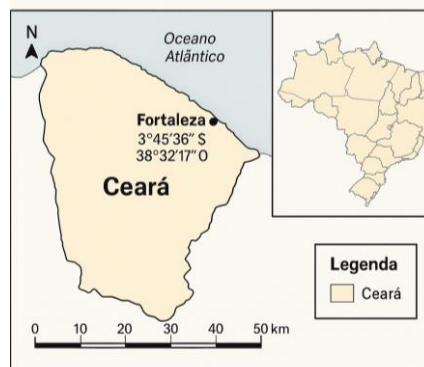


Figura 3. Localização da obra em estudo.

A interface gráfica da calculadora (Figura 4) permite a inserção dos parâmetros de entrada, além da seleção dos materiais utilizados na obra e das respectivas quantidades, expressas em toneladas ou litros. 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. Esses materiais, bem como seus fatores de emissão correspondentes, estão apresentados na Tabela 1.



Figura 4: Interface gráfica da calculadora.



Tabela 1. Fatores Emissão utilizados (Fonte: adaptado Costa, 2012)

Material	Fator de emissão (tCO <sub>2</sub> /L)
Óleo diesel puro	0,0032
Barras de aço	1,8452
Concreto 30 MPa - CP II-E-32	0,1513

O dimensionamento dos materiais foi realizado considerando a execução de 165 estacas do tipo hélice contínua monitorada, sendo 82 com diâmetro de 400 mm e 83 com diâmetro de 500 mm. O prazo total estimado para a conclusão dos serviços foi de 21 dias. A estimativa contemplou o consumo de óleo diesel, utilizado como combustível na perfuratriz, o volume de concreto necessário para a execução das estacas e a quantidade de barras de aço CA-50 empregadas nas armaduras. A Tabela 2 apresenta os quantitativos associados à execução da obra, enquanto a Tabela 3 exhibe os valores dos fatores de emissão totais, calculados automaticamente pela ferramenta desenvolvida.

Tabela 2. Quantidade de material utilizado na execução.

Itens	Valores utilizados na execução
Óleo diesel puro	3.150 L
Barras de aço	8,27 t
Concreto 30 MPa - CP II-E-32	383,20 t

Tabela 3. Materiais utilizados e fator de emissão total.

Material	Fator de emissão total (tCO <sub>2</sub> e)
Barras de aço	15,26
Concreto 30 MPa - CP II-E-32	57,96
Óleo diesel puro	10,08
Total de Carbono Emitido	83,30

O gráfico apresentado na Figura 5, em escala logarítmica, evidencia a discrepância entre os materiais quanto ao fator de emissão total, possibilitando a visualização simultânea de insumos com emissões elevadas e reduzidas. O concreto 30 MPa com cimento CP II-E-32 destaca-se como o maior emissor, com aproximadamente 58 t de CO<sub>2</sub>, resultado da significativa pegada de carbono do cimento Portland aliada ao grande volume utilizado.

Em seguida, as barras de aço aparecem com cerca de 15 t de CO<sub>2</sub>, refletindo tanto o elevado consumo nas armaduras quanto a alta demanda energética em seu processo de fabricação. Já o óleo diesel puro, embora possua alta intensidade de emissão por litro, apresenta o menor impacto absoluto, com cerca de 10 tCO<sub>2</sub>e, devido ao baixo consumo nas operações da obra.

Esses resultados reforçam a importância da seleção criteriosa de materiais e da otimização no uso de combustíveis fósseis como estratégias para a redução dos impactos ambientais.

O gráfico da Figura 6 apresenta a distribuição percentual das emissões de carbono, evidenciando o concreto como o principal responsável (69,6%), seguido pelo aço (18,3%) e pelo diesel (12,1%).



Conforme Bernet (2023), uma árvore é capaz de absorver, em média, 15,6 kg de CO<sub>2</sub> por ano, valor adotado como base para estimar a compensação necessária. Com base nesse índice, seriam necessárias 5.339 árvores para neutralizar completamente as emissões de carbono geradas pelo projeto.

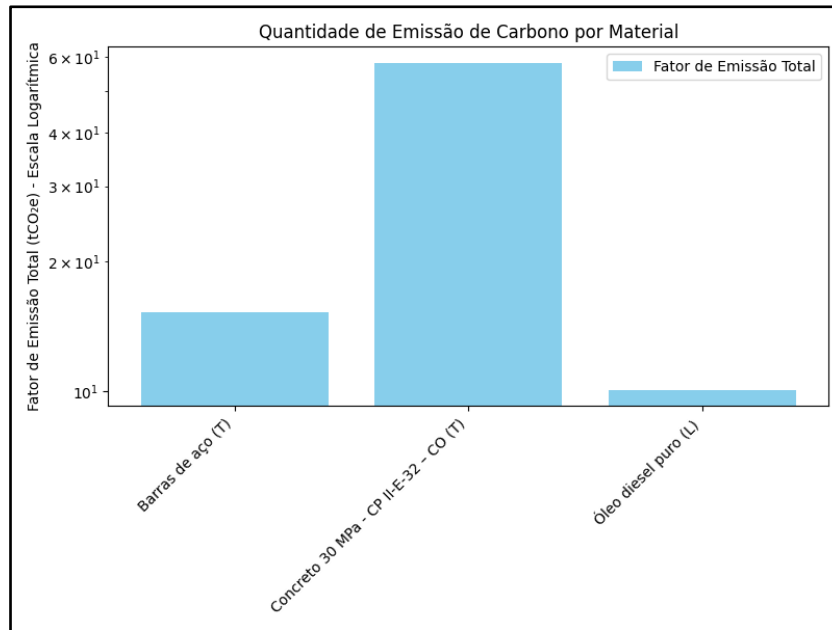


Figura 5. Fator de emissão total de carbono por material.

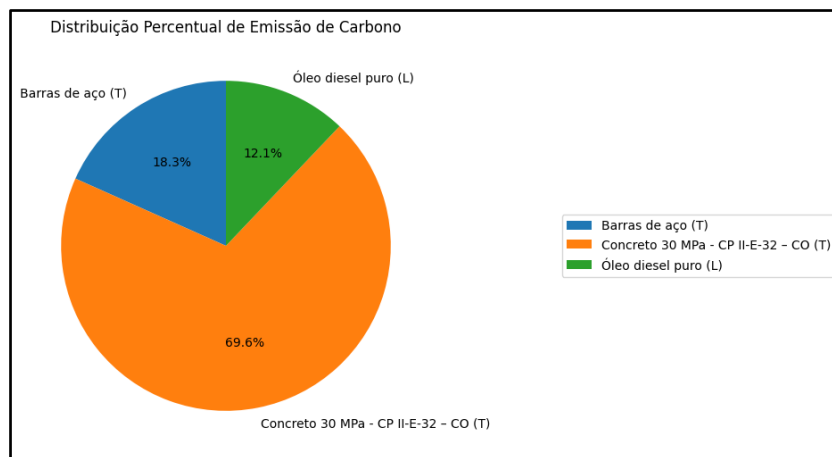


Figura 6. Distribuição de emissão de carbono.

## 5 CONCLUSÕES

A presente pesquisa evidenciou a eficácia da avaliação do ciclo de vida como ferramenta para a quantificação dos impactos ambientais associados à execução de estacas hélice contínua, em uma obra localizada em Fortaleza-CE. Por meio do desenvolvimento de uma calculadora em Python, foi possível estimar as emissões totais de carbono do projeto, que atingiram 83,30 tCO<sub>2</sub>e, com o concreto figurando como o principal responsável pelas emissões.

A análise dos resultados destacou a influência direta da escolha dos materiais e do consumo de combustíveis no desempenho ambiental das fundações. Como estratégia de mitigação, foi proposta a



compensação por meio do plantio de aproximadamente 5.339 árvores, considerando uma absorção média de 15,6 kg de CO<sub>2</sub> por ano por árvore, conforme dados da literatura.

Conclui-se, portanto, que a integração entre ferramentas computacionais e práticas construtivas sustentáveis representa um caminho promissor que visa contribuir para a redução da pegada de carbono na construção civil. A replicação desta metodologia em outras obras pode fortalecer o compromisso do setor com soluções ambientalmente responsáveis e tecnicamente viáveis.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pelo apoio financeiro e incentivo à pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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*, Elsevier, v. 440, p. 140860, 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.
- Bernet, Ross. How much CO<sub>2</sub> does a tree absorb? One Tree Planted, 25 jul. 2023. Disponível em: <https://onetreepanted.org/blogs/stories/how-much-co2-does-tree-absorb?srsltid=AfmBOoqh0NJ46y34YrDSen-mo1wNfAXTa4pA96N6EGSLm9TvnNAU3S8F>. Acesso em: 17 abr. 2025.
- Costa, B. L. D. C. (2012). Quantificação das emissões de CO<sub>2</sub> geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE.
- 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*, ACS Publications, v. 123, n. 5, p. 1843–1888, 2022.
- Faria, R. C. A. Metodologia de avaliação da emissão incorporada de gee no estoque de edifícios construídos. 2024.
- Giaquinto, J. P. d. O. Uso do ESG e a importância na construção civil no Brasil. 2024.
- 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. 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.
- 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.
- 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.
- 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, M. H., Sanches, J. C. M., & Domingos, R. M. A. (2023). Impacto da ação meteorológica no cronograma de execução de estacas hélice contínua. *E&S Engineering and Science*, 12(2), 1-13.
- 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.

