XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.5/28

AVALIAÇÃO DA PEGADA DE CARBONO DE ESTACAS HÉLICE CONTÍNUA EM SOLO COLAPSÍVEL DO DISTRITO FEDERAL

Cássia Maeda Araújo
Engenheira Civil, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, cassia.maeda@hotmail.com

Renato Pinto da Cunha
Professor Titular, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, rpcunha@unb.br

RESUMO: As emissões de gases de efeito estufa associadas à construção civil têm motivado a busca por soluções construtivas com menor impacto ambiental. No contexto geotécnico, a execução de fundações profundas representa uma parcela relevante das emissões iniciais de carbono, especialmente em obras implantadas sobre solos colapsíveis, amplamente distribuídos no Distrito Federal. Este trabalho apresenta uma avaliação da pegada de carbono associada à execução de estacas hélice contínua em uma edificação residencial localizada no Distrito Federal. A metodologia adotada baseia-se nos princípios da Avaliação do Ciclo de Vida (Life Cycle Assessment – LCA), considerando exclusivamente a fase construtiva e contemplando as emissões relacionadas à produção de materiais, transporte de insumos e operação dos equipamentos utilizados durante a execução das fundações. Os resultados indicaram que a produção de materiais constitui a principal fonte de emissões da fase construtiva, representando aproximadamente 95% do total estimado, com predominância das contribuições do concreto e do aço. As emissões associadas ao transporte e à operação dos equipamentos apresentaram participação significativamente menor. Os resultados obtidos evidenciam o potencial da metodologia empregada para identificar os principais processos emissores e subsidiar a adoção de estratégias voltadas à redução da pegada de carbono em projetos de fundações profundas.

PALAVRAS-CHAVE: Pegada de carbono, Estacas hélice contínua, Fundações profundas, Solo colapsível, Sustentabilidade.

ABSTRACT: Greenhouse gas emissions associated with the construction industry have driven the search for more environmentally sustainable construction solutions. In geotechnical engineering, the execution of deep foundations represents a significant share of early-stage carbon emissions, particularly in projects founded on collapsible soils, which are widely distributed throughout the Federal District of Brazil. This paper presents an assessment of the carbon footprint associated with the construction of continuous flight auger (CFA) piles for a residential building located in the Federal District. The methodology is based on the principles of Life Cycle Assessment (LCA) and considers exclusively the construction phase, including emissions related to material production, transportation of inputs, and operation of construction equipment. The results indicated that material production is the main source of emissions during the construction phase, accounting for approximately 95% of the total estimated carbon footprint, with concrete and steel representing the largest contributions. Emissions associated with transportation and equipment operation showed a significantly smaller contribution. The findings demonstrate the applicability of the adopted methodology for identifying the main emission sources and supporting strategies aimed at reducing the carbon footprint of deep foundation projects.

KEYWORDS: Carbon footprint, Continuous flight auger piles, Deep foundations, Collapsible soils, Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas e o aumento das emissões de gases de efeito estufa têm impulsionado o desenvolvimento de práticas construtivas com menor impacto ambiental. A construção civil destaca-se como setor intensivo em consumo de materiais e energia, especialmente devido ao uso de cimento e aço, materiais com elevada emissão de CO_2 durante sua produção. No campo da geotecnia, as fundações profundas representam uma etapa relevante em termos de emissões, embora frequentemente não sejam avaliadas de forma isolada em estudos ambientais.

Em regiões como o Distrito Federal, onde predominam solos colapsíveis, diferentes soluções de fundação podem ser adotadas, influenciando não apenas o desempenho técnico, mas também o impacto ambiental do empreendimento. Este artigo apresenta a etapa metodológica, cujo objetivo é avaliar a pegada de carbono de soluções típicas de fundação utilizando princípios da Avaliação do Ciclo de Vida (LCA).

Este trabalho insere-se no contexto da crescente incorporação de critérios ambientais na engenharia geotécnica, especialmente na fase de concepção de soluções de fundação, contribuindo para a avaliação de alternativas sob a ótica da sustentabilidade.

2 FUNDAÇÕES EM SOLOS COLAPSÍVEIS E PEGADA DE CARBONO

Os solos colapsíveis são materiais não saturados que apresentam redução significativa de volume quando submetidos ao aumento de umidade ou carregamento adicional. Esse comportamento está associado à estrutura metastável do solo, caracterizada por elevados índices de vazios e pela presença de forças capilares responsáveis pela estabilidade temporária da estrutura granular.

No Distrito Federal, esses solos são amplamente distribuídos e frequentemente associados a depósitos lateríticos e materiais residuais. Em função dessas características geotécnicas, fundações profundas são frequentemente adotadas para garantir a transferência segura das cargas estruturais para camadas mais resistentes do subsolo.

Entre as soluções mais utilizadas destacam-se as estacas hélice contínua, executadas por meio da perfuração do solo com trado helicoidal contínuo, seguida da injeção de concreto durante a retirada da hélice e posterior inserção da armadura, e as estacas escavadas, executadas por meio da escavação do fuste com posterior concretagem.

Do ponto de vista ambiental, a execução dessas fundações envolve diferentes fontes potenciais de emissão de gases de efeito estufa, conforme ilustrado na Figura 1.

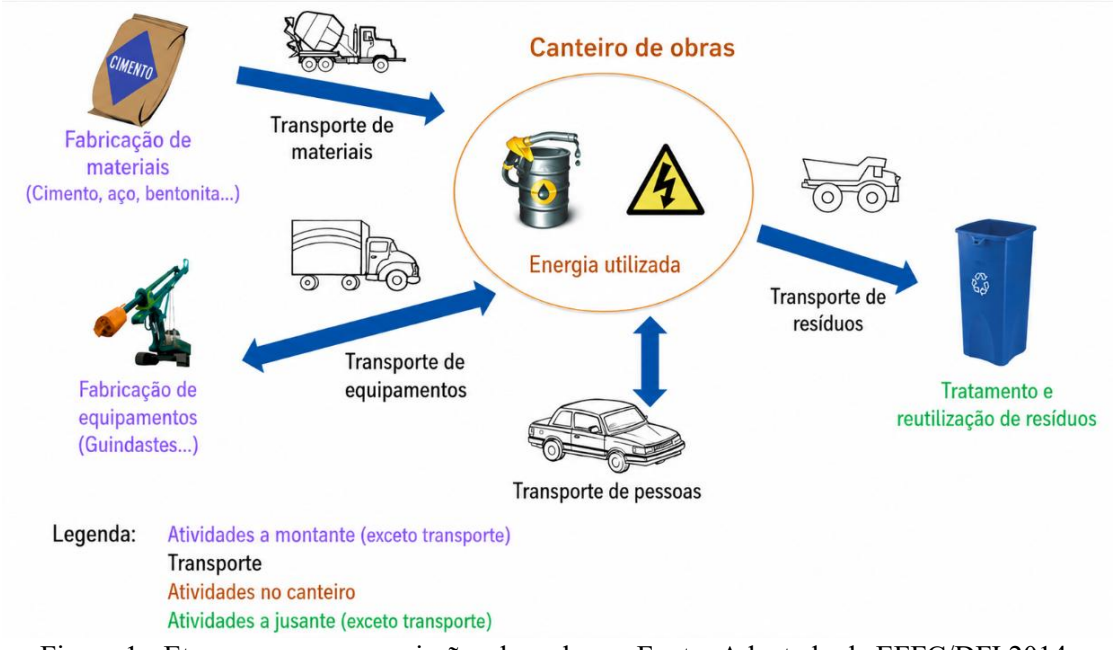


Figura 1 - Etapas que geram emissões de carbono. Fonte: Adaptado de EFFC/DFI,2014.

3 METODOLOGIA

A análise foi limitada à fase de construção das fundações, abrangendo produção de materiais, transporte de insumos e equipamentos, consumo energético durante execução e geração de resíduos. Não foram consideradas as fases de uso, manutenção ou desativação da edificação.

O estudo foi desenvolvido a partir de uma edificação residencial localizada em Brasília, com perfil geotécnico composto predominantemente por argilas areno-siltosas e siltes argilosos com comportamento colapsível. Foram utilizados dados reais de projeto, investigação geotécnica e informações executivas como base para a modelagem das alternativas de fundação. A metodologia adotada é compatível com abordagens recentes aplicadas especificamente a obras de fundações, como a proposta por Mazzutti (2023), que também utiliza a relação entre nível de atividade e fator de emissão para quantificação das emissões.

A abordagem permite ainda a realização de análises de sensibilidade a partir da variação dos parâmetros de entrada, possibilitando avaliar o impacto de diferentes cenários de projeto sobre a pegada de carbono.

3.1 Aplicação da Metodologia LCA

A modelagem ambiental foi realizada utilizando inventários de carbono internacionais (ICE e Ecoinvent).

O cálculo da pegada de carbono é efetuado pela multiplicação entre o nível de atividade (quantidade de material, distância percorrida ou tempo de operação) e o fator de emissão correspondente, conforme demonstrado na Equação 3.1. Foram avaliadas as emissões associadas às principais etapas do processo construtivo das fundações, incluindo a produção dos materiais estruturais utilizados nas estacas, especialmente concreto e aço, o transporte do concreto até o local da obra por caminhões betoneira e a operação dos equipamentos utilizados durante a execução das estacas. Para a obra analisada foram executadas 222 estacas hélice contínua, sendo levantadas informações referentes ao consumo total de materiais, incluindo o volume de concreto utilizado na concretagem das estacas e o consumo de aço empregado nas armaduras.

Além disso, foram considerados dados operacionais relacionados à execução das estacas, tais como o tempo médio de perfuração e de concretagem, o consumo de combustível dos equipamentos utilizados durante a execução e as distâncias percorridas pelos caminhões betoneira no transporte do concreto entre a central de concreto e o local da obra. Esses dados permitiram estimar as emissões de carbono associadas às diferentes atividades envolvidas na execução das fundações profundas.

Os resultados finais serão expressos em termos absolutos e normalizados (kg CO_2eq/m³ de concreto, kg CO_2eq/m linear e kg CO_2eq/kN), permitindo comparações diretas entre as alternativas analisadas.

3.2 Cálculo das Emissões de Carbono na Execução das Estacas

As emissões de gases de efeito estufa foram estimadas para a fase construtiva das fundações, considerando as principais fontes associadas à execução das estacas: (i) produção de materiais (concreto e aço), (ii) transporte do concreto até a obra e (iii) operação dos equipamentos empregados durante a perfuração e concretagem. O cálculo da pegada de carbono foi realizado por meio da abordagem atividade–fator de emissão, na qual cada fonte de emissão é obtida pela multiplicação entre o nível de atividade e o respectivo fator de emissão, conforme a Equação 3.1.

$$E_{CO2eq} = \Sigma\ (A_i \times FE_i) \qquad (3.1)$$

Em que E_{trans} representa a emissão associada ao transporte (kg CO_2eq), D_{tot} corresponde à distância total percorrida (km) e FE_{trans} ao fator de emissão adotado para o transporte (kg CO_2eq/km).

As emissões relacionadas aos materiais foram calculadas separadamente para concreto e aço, conforme as Equações 3.2 e 3.3.

$$E_{conc} = V_{conc} \times FE_{conc} \qquad (3.2)$$

$$E_{aco} = M_{aco} \times FE_{aco} \quad (3.3)$$

Em que E_{conc} e E_{aco} representam as emissões associadas à produção de concreto e aço, respectivamente; V_{conc} corresponde ao volume total de concreto utilizado; M_{aco}à massa total de aço consumida; e FE_{conc}e FE_{aco}aos respectivos fatores de emissão.

Para permitir comparação e normalização, também foram obtidos indicadores médios por estaca, dividindo-se os valores totais pelo número de estacas executadas (N = 222).

As emissões do transporte do concreto foram calculadas a partir da distância percorrida pelos caminhões betoneira entre a central de concreto e a obra e do fator de emissão adotado para o transporte, conforme apresentado na Equação 3.4.

$$E_{trans} = D_{tot} \times FE_{trans} \quad (3.4)$$

Onde, E_{trans} é a emissão do transporte (kg CO_2eq), D_{tot} é a distância total percorrida (km) e FE_{trans} é o fator de emissão do transporte (kg CO_2eq/km)

Quando os dados operacionais estão em termos de combustível, o transporte pode ser calculado pela relação da Equação 3.5.

$$E_{trans} = C_{diesel,trans} \times FE_{diesel} \quad (3.5)$$

Em que $C_{diesel,trans}$ é o consumo de diesel associado ao transporte (L) e FE_{diesel} é o fator de emissão do diesel (kg CO_2eq/L)

As emissões operacionais (Equação 3.6) consideraram principalmente o consumo de combustível da perfuratriz durante a execução das estacas e, quando aplicável, o consumo associado a equipamentos auxiliares.

$$E_{eq} = C_{diesel,eq} \times FE_{diesel} \quad (3.6)$$

Onde E_{eq} é a emissão associada à operação dos equipamentos (kg CO_2eq), $C_{diesel,eq}$ é o consumo total de diesel dos equipamentos (L) e FE_{diesel} é o fator de emissão do diesel (kg CO_2eq/L).

Quando o levantamento de campo forneceu tempos de operação (tempo médio de perfuração e concretagem), o consumo de combustível pode ser obtido a partir de uma taxa de consumo do equipamento conforme Equação 3.7.

$$C_{diesel,eq} = T_{op} \times C_{eq} \quad (3.7)$$

Em que, T_{op} é o tempo total de operação (h) e C_{eq} é o consumo específico do equipamento (L/h).

O tempo total de operação pode ser estimado a partir do tempo médio por estaca multiplicado pelo número de estacas executadas.

A emissão total da fase construtiva foi obtida pela soma das contribuições de materiais, transporte e equipamentos (Equação 3.8).

$$E_{total} = E_{conc} + E_{aco} + E_{trans} + E_{eq} \quad (3.8)$$

Além do valor total, foram calculados indicadores normalizados para facilitar comparações entre soluções, como emissão por estaca, por metro linear de estaca (quando disponível o comprimento total executado) e por volume de concreto.

4 RESULTADOS PARCIAIS E DISCUSSÃO

Os resultados parciais foram obtidos para 222 estacas hélice contínua com diâmetro de 0,60 m (r = 0,30 m) e profundidade variando entre 15 e 22 m. O volume de concreto foi estimado pela geometria cilíndrica ($V = \pi r^2 L$). As emissões foram calculadas pelo método atividade–fator de emissão, considerando: produção de concreto e aço, transporte do concreto e operação da perfuratriz. Os fatores de emissão adotados neste estudo foram selecionados com base em valores amplamente utilizados em estudos de Avaliação do Ciclo de Vida aplicados à construção civil e fundações, tomando como referência os bancos de dados Ecoinvent e Inventory of Carbon and Energy (ICE), além da metodologia proposta por Mazzutti (2023). Na ausência de registros operacionais de obra, as emissões de transporte e equipamentos foram estimadas por parâmetros usuais, a serem refinados quando disponíveis dados medidos.

Tabela 1 – Volume estimado de concreto das estacas (por estaca e total).

Parâmetro	**15 m**	**18,5 m (médio)**	**22 m**
Volume por estaca (m³/estaca)	4.24	5.23	6.22
Volume total (m³) – 222 estacas	941.5	1161.2	1380.9

Para os resultados de emissões, adotaram-se como premissas: fator de emissão do concreto (300 kg CO_{2eq}/m³); fator de emissão do aço (1.70 kg CO_{2eq}/kg); taxa de armadura (100 kg aço/m³ de concreto). Para transporte, adotou-se capacidade de 8 m³ por viagem, distância média de 15 km (trecho) e consumo de 0.40 L/km. Para a perfuratriz, adotou-se produtividade de 15 m/h e consumo de 30 L/h. O fator de emissão do diesel considerado foi 2.67 kg CO_2/L.

Tabela 2 – Emissões estimadas por fonte (t CO_2eq) para os cenários de profundidade.

Fonte	**15 m**	**18,5 m**	**22 m**	**Unidade**
Concreto	282.5	348.4	414.3	t CO_{2eq}
Aço	160.1	197.4	234.8	t CO_{2eq}
Transporte do concreto	3.8	4.7	5.5	t CO_{2eq}
Equipamentos (perfuratriz)	17.8	21.9	26.1	t CO_{2eq}
TOTAL	464.1	572.4	680.6	t CO_{2eq}

Tabela 3 – Contribuição relativa das fontes no cenário médio (18,5 m).

Fonte	**Emissão (t CO_{2eq})**	**Contribuição (%)**
Concreto	348.4	60.9
Aço	197.4	34.5
Transporte do concreto	4.7	0.8
Equipamentos (perfuratriz)	21.9	3.8

Os resultados parciais indicam que a produção de materiais domina a pegada de carbono da fase construtiva, com predominância do concreto, seguida do aço. As emissões operacionais (equipamentos e transporte) apresentam parcela menor, porém mensurável, e deverão ser refinadas a partir de dados de consumo de combustível e logística de fornecimento do concreto do empreendimento.

Como forma de validação dos resultados obtidos, foi realizada uma comparação com a metodologia proposta por Mazzutti (2023), que desenvolveu uma calculadora específica para estimativa da pegada de carbono em obras de fundações.

No estudo de Mazzutti (2023), as emissões associadas à produção de materiais representam aproximadamente 89% do total, com predominância do concreto e do aço, enquanto as emissões relacionadas à operação de equipamentos e transporte apresentam participação significativamente menor.

No presente estudo, para o cenário médio analisado (18,5 m), observa-se comportamento semelhante, com aproximadamente 95% das emissões concentradas na produção de materiais (concreto e aço), conforme apresentado na Tabela 3.

Essa proximidade entre os resultados reforça a consistência da abordagem adotada, indicando que a metodologia aplicada é capaz de representar adequadamente a distribuição das emissões entre as principais fontes envolvidas na execução de fundações profundas.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a aplicação da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (Life Cycle Assessment – LCA) para estimativa da pegada de carbono associada à execução de fundações profundas em solos colapsíveis do Distrito Federal. A análise foi desenvolvida a partir de um estudo de caso envolvendo a execução de 222 estacas hélice contínua com diâmetro de 0,60 m e profundidades variando entre 15 e 22 m.

Os resultados obtidos indicam que a produção de materiais representa a principal fonte de emissões de carbono na fase construtiva das fundações. Em particular, o concreto apresenta a maior contribuição para a pegada de carbono total, em função do elevado volume utilizado na concretagem das estacas, seguido pelas emissões associadas à produção de aço das armaduras. As emissões operacionais relacionadas ao transporte do concreto e à operação da perfuratriz apresentaram participação menor no inventário total, embora constituam parcela relevante para a consolidação do balanço completo das emissões da fase construtiva.

A análise realizada permitiu identificar os principais processos responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa na execução de estacas hélice contínua, evidenciando a predominância das emissões associadas aos materiais estruturais. Esses resultados estão em consonância com estudos recentes sobre pegada de carbono em sistemas construtivos, nos quais a produção de materiais é frequentemente responsável pela maior parcela das emissões incorporadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília e às agências de fomento CNPq e CAPES pelo apoio às atividades de pesquisa.

Agradecem também à pesquisadora Elisângela A. Mazzutti e ao Prof. Vitor Faro pelas contribuições ao desenvolvimento de metodologias para estimativa de emissões de carbono em obras de fundações, que serviram de referência para este estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR 6484: *Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2001.

ISO. ISO 14040: *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*. Geneva: International Organization for Standardization, 2006.

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

MOON, H.; HYUN, C.; HONG, T. *Prediction model of CO_2 emission for residential buildings in South Korea.* Journal of Management Engineering, v. 30, n. 3, p. 04014001, 2014.

ROJAS REYES, A. A. *Sazonalidade e comportamento de um solo colapsível de Brasília.* 2013. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2013.