

Análise da influência do formato da sapata na tensão admissível do solo e seu impacto no carbono incorporado

Samuel Honório Silva Araújo*, Marco Aurélio Rodrigues de Melo, Olívia Maria Oliveira da Silva e Márcio Santos Gonçalves

Centro Universitário - UNIESP. Rodovia BR-230, km 14, S/Nº. Morada Nova. Cabedelo-PB, Brasil (CEP 58109-303). *E-mail: 2021110760001@iesp.edu.br.

Resumo. Este artigo analisa a influência do formato das sapatas de fundação - corrida, quadrada e circular - na tensão admissível do solo e no carbono incorporado durante o processo construtivo. O estudo tem como objetivo comparar o desempenho estrutural e ambiental das diferentes geometrias, utilizando o método teórico de Terzaghi para determinação da tensão admissível (σ_{adm}) em solos de naturezas distintas, considerando variações de consistência e compacidade representadas pelos valores de NSPT. As equações foram aplicadas para estimar a capacidade de carga em solos argilosos e arenosos, e os resultados foram organizados em tabelas comparativas. Observou-se que, em solos argilosos, as sapatas quadradas e circulares apresentaram valores de tensão admissível semelhantes, enquanto as corridas exibiram reduções de até 19,7%. Já em solos arenosos, as sapatas corridas alcançaram as maiores tensões, superando as circulares em até 26,2%. Além disso, verificou-se que a geometria influencia o volume de materiais utilizados e, conseqüentemente, o carbono incorporado da fundação. Conclui-se que o formato da sapata exerce papel determinante tanto no desempenho técnico quanto na sustentabilidade das fundações, sendo essencial sua análise integrada em projetos de engenharia civil.

Palavras-chave: Fundações; Sapatas; Geotecnia; Geometria.

Abstract. *Analysis of the influence of footing shape on allowable soil stress and its impact on embodied carbon.* This article analyzes the influence of foundation footing shapes - strip, square, and circular - on the allowable soil stress and the embodied carbon during the construction process. The study aims to compare the structural and environmental performance of different geometries, using Terzaghi's theoretical method to determine the allowable stress (σ_{adm}) in various soil types, considering variations in both consistency and compactness represented by NSPT values. The equations were applied to

Recebido
06/07/2025

Aceito
11/08/2025

Publicado
31/08/2025



Acesso aberto



ORCID

0009-0003-3635-0707
Samuel Honório Silva
Araújo

0000-0002-8804-6710
Marco Aurélio
Rodrigues de Melo

0009-0008-4716-4260
Olívia Maria Oliveira da
Silva

0000-0001-6702-0020
Márcio Santos Gonçalves

estimate the bearing capacity in clayey and sandy soils, and the results were organized into comparative tables. It was observed that, in clayey soils, square and circular footings presented similar allowable stress values, while strip footings showed reductions of up to 19.7%. In sandy soils, however, strip footings achieved the highest stresses, surpassing circular ones by up to 26.2%. Furthermore, it was found that geometry influences the material volume and, consequently, the embodied carbon. It is concluded that the footing shape plays a decisive role in both the technical performance and sustainability of foundations, making its integrated analysis essential in civil engineering projects.

Keywords: Foundations; Footings; Geotechnics; Geometry.

Introdução

As fundações têm a função de transferir as cargas de uma edificação ao solo de forma segura, garantindo estabilidade e durabilidade e evitando problemas como recalques diferenciais (Santos, 2025). A escolha do tipo de fundação depende das características e resistência do solo, cargas atuantes e condições ambientais, podendo ser classificadas em superficiais ou profundas (Mello, 2021).

Conforme Terzaghi e Peck (1967), o formato da sapata influencia diretamente a tensão admissível do solo, afetando as dimensões da fundação e a quantidade de materiais utilizados. Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da geometria da base das sapatas na tensão admissível do solo e no carbono incorporado associado.

O carbono incorporado corresponde às emissões de gases de efeito estufa (GEE) ao longo do ciclo de vida dos materiais e processos construtivos, abrangendo as etapas A1-A5 de acordo com as normas ISO 14040 (ISO, 2006) e EN 15804 (CEN, 2012). Essas etapas incluem extração, processamento, fabricação, transporte e execução. Em cenários de descarbonização, estratégias que reduzam o volume de materiais empregados tornam-se essenciais para diminuir o carbono incorporado (Pereira, 2023). As Declarações Ambientais de Produto (DAPs) e ferramentas de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tornam-se fundamentais para orientar decisões de projeto (Brás, 2024).

Nesse contexto, este trabalho analisa como diferentes formatos de sapatas influenciam a tensão admissível e o carbono incorporado, estabelecendo comparações entre geometrias corridas, quadradas e circulares.

Fundamentação teórica

A construção civil é um dos setores de maior impacto ambiental global (UNEP, 2022). No dimensionamento das fundações superficiais, a tensão admissível do solo define diretamente as dimensões das sapatas (Velloso e Lopes, 2010). Como o volume de material e o carbono incorporado estão associados a essas dimensões (Hák et al., 2016), a geometria torna-se elemento estratégico do projeto.

Processos executivos como escavação, armação, fôrmas e concretagem também contribuem para o impacto ambiental. As fundações com áreas maiores demandam maior volume de escavação e uso de equipamentos, influenciando emissões nas etapas A4 e A5. O formato da sapata, portanto, afeta tanto o desempenho geotécnico quanto o impacto ambiental.

Segundo Ige et al. (2024), ajustes geométricos podem reduzir significativamente o volume de materiais e suas emissões. As reduções na área da base acarretam diminuições relevantes no volume de concreto, especialmente em obras com grande número de fundações. Dessa forma, a análise integrada entre geometria, tensão admissível e carbono incorporado deve fazer parte da concepção estrutural.

Impactos ambientais causados pelas fundações

O concreto e o aço são os materiais de maior impacto nas fundações devido às emissões associadas à sua produção (Barros, 2021). Os concretos convencionais emitem entre 150 e 350 kg CO₂/m³, enquanto o aço apresenta emissões entre 1,7 e 2,0 kg CO₂/kg (Pereira, 2023). O transporte desses materiais adiciona emissões significativas, variando conforme distâncias percorridas.

Escavações exigem máquinas de grande porte, que elevam consumo energético e emissões. A geometria da fundação influencia diretamente esses processos. Soluções como sapatas trapezoidais permitem reduzir volumes de concreto em regiões com menores tensões (Borges, 2016). As sapatas flexíveis diminuem a altura e, portanto, o volume total de concreto; e as sapatas rígidas podem reduzir armaduras em situações de esforços concentrados (Calado, 2018).

Histórico da inclusão do fator de forma

Terzaghi (1943) desenvolveu o primeiro modelo consistente para capacidade de carga em fundações rasas. Posteriormente, Terzaghi e Peck (1967) introduziram fatores de forma, demonstrando que a geometria da sapata influencia a distribuição de tensões no solo.

Como observam Cintra e Aoki (2010) e Cintra et al. (2011), o sistema sapata-solo deve ser analisado conjuntamente, e a geometria da sapata altera o mecanismo de ruptura e o comportamento resistente. Os fatores de forma clássicos estão apresentados na Tabela 1 e são utilizados neste trabalho.

Tabela 1. Apresenta os resultados obtidos para solos argilosos.

Sapata	<i>Sc</i>	<i>Sq</i>	<i>Sγ</i>
Corrida	1	1	1
Quadrada	1,2	1	0,8
Circular	1,2	1	0,6

Fonte: Adaptado de Terzaghi e Peck (1967).

Tipos de ruptura

Conforme Cintra et al. (2011), os mecanismos de ruptura em sapatas rasas podem ser:

- Ruptura geral - solos resistentes, com superfícies de cisalhamento bem definidas;
- Ruptura por punção - solos moles, com afundamento progressivo; e
- Ruptura local - comportamento intermediário, em solos medianamente resistentes.

O tipo de ruptura depende essencialmente da rigidez do solo, representada pelo NSPT.

Carbono incorporado em concreto e aço e sua relação com a geometria da fundação

O concreto contribui significativamente para o *Global Warming Potential* (GWP) pelo seu grande volume nas fundações, enquanto o aço apresenta emissões elevadas por massa. As operações de escavação, transporte e execução intensificam o impacto ambiental.

Reduções geométricas na base podem diminuir o volume de concreto e influenciar taxas de armadura (Sheng et al., 2024). As geometrias como a trapezoidal permitem maior eficiência de material.

Metodologia

A metodologia foi dividida em duas etapas: levantamento bibliográfico e análise quantitativa, utilizando as bases de dados da SciELO, Capes, *Scopus* e BDTD, incluindo obras clássicas de geotecnia (Sousa e Marco, 2024). Na segunda etapa, foram comparados diferentes formatos de sapata para avaliar a influência geométrica na tensão admissível.

Os resultados obtidos podem fundamentar as análises futuras em esquemas de classificação como o SCORS (Arnold et al., 2020), que avalia emissões estruturais nas fases A1-A5.

Método de cálculo

O método de cálculo adotado neste estudo se baseia na formulação teórica clássica proposta por Terzaghi, amplamente reconhecida como um dos modelos mais consolidados para estimar a capacidade de carga de fundações rasas. Essa abordagem permite determinar a tensão de ruptura (σ_r) que o solo é capaz de resistir antes de atingir seu estado limite último, considerando diferentes configurações geométricas de sapatas - corrida, quadrada e circular - e incorporando as variações de comportamento decorrentes da consistência das argilas e da compactidade das areias, expressas por valores representativos de NSPT. A escolha desse método se justifica pela sua robustez, simplicidade e ampla aceitação na prática geotécnica, além da possibilidade de comparar diretamente a influência da geometria na tensão mobilizada.

Na formulação de Terzaghi (1943), a capacidade de carga última é decomposta em três parcelas distintas, cada uma associada a um mecanismo físico específico. A primeira parcela está relacionada à coesão do solo (c), representando a resistência intrínseca do material mesmo na ausência de tensões normais aplicadas. A segunda parcela considera o efeito do embutimento da fundação (q), que depende da pressão efetiva atuante na profundidade da base e contribui para aumentar a resistência devido ao confinamento adicional do solo. Já a terceira parcela refere-se ao atrito interno (ϕ), responsável pela formação de cunhas de ruptura que se desenvolvem lateralmente a partir da base da sapata, sendo fortemente influenciada pelo peso específico (γ), pela largura (B) da fundação e pelos fatores de capacidade de carga que variam conforme o ângulo de atrito.

A influência da geometria da sapata é incorporada por meio dos fatores de forma (Sc , Sq e Sy), que ajustam cada parcela da equação às características específicas do formato - corrida, quadrado ou circular - refletindo diferenças experimentais observadas no desenvolvimento das superfícies de ruptura. Assim, o método não apenas estima a resistência última do solo, mas também permite quantificar como alterações no formato da sapata afetam diretamente a capacidade de carga e, por consequência, a área necessária para suportar determinada carga estrutural. A Equação 1 sintetiza essa formulação geral, conforme apresentada por Sousa (2023), e serviu de base para todas as análises realizadas

neste trabalho. A partir dos valores obtidos para σ_r , procedeu-se posteriormente ao cálculo da tensão admissível (σ_{adm}) mediante aplicação do coeficiente de segurança, permitindo estabelecer comparações consistentes entre as diferentes configurações geométricas avaliadas.

$$\sigma_r = c \cdot N_c \cdot S_c + q \cdot N_q \cdot S_q + 0,5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \cdot S_\gamma \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

σ_r = capacidade de carga última do solo;

c = coesão do solo;

γ = peso específico do solo;

B = largura da fundação;

q = pressão efetiva no nível da base da fundação;

N_c , N_q e N_γ = fatores de capacidade de carga dependentes do ângulo de atrito interno(ϕ); e

S_c , S_q e S_γ = fatores de forma que variam conforme a geometria da sapata.

Para converter a tensão de ruptura (σ_r) em tensão admissível (σ_{adm}), adotou-se o coeficiente de segurança igual a 3, conforme recomendações da NBR 6122:2019 (ABNT, 2019), para fundações rasas (Equação 2). Essa redução é necessária porque a tensão de ruptura representa a resistência última teórica do solo, associada ao início do colapso geotécnico, como os projetos de engenharia devem operar em um patamar muito mais conservador, garantindo que a fundação trabalhe dentro de níveis seguros e compatíveis com as variações naturais do terreno. O coeficiente de segurança leva em consideração incertezas inerentes ao comportamento do solo, como heterogeneidade, variações de umidade e possíveis imprecisões nas investigações geotécnicas, além de contemplar limitações do próprio modelo teórico utilizado. Assim, a tensão admissível é obtida dividindo-se σ_r por 3, assegurando que a fundação trabalhe com uma margem de segurança adequada frente às condições reais do subsolo e preservando o desempenho estrutural ao longo da vida útil da edificação.

$$\sigma_{adm} = \sigma_r / 3 \quad \text{Equação 2}$$

Resultado e discussão

A análise dos resultados obtidos a partir da modelagem numérica e dos cálculos de dimensionamento evidencia de forma quantitativa a relação de interdependência entre o formato da base das sapatas, a tensão admissível do solo e o carbono incorporado. Esta seção apresenta e discute os dados que permitem comparar o desempenho de diferentes configurações geométricas, retangular, trapezoidal e com seção vazada, frente aos critérios de tensão no solo e de volume de concreto.

Os resultados são analisados com o objetivo de validar a premissa central de que a otimização da forma da sapata, ao redistribuir as tensões de forma mais eficiente e reduzir a quantidade de material, constitui uma estratégia viável e eficaz para a minimização do impacto carbônico das fundações superficiais.

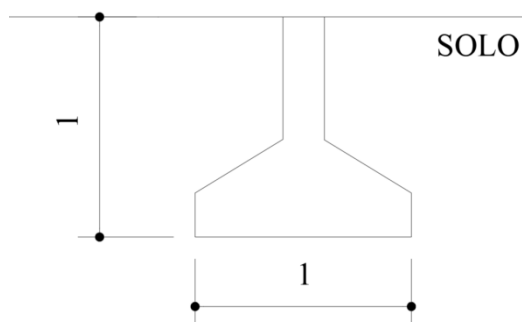
Casos analisados

Para este trabalho, definiu-se a utilização de uma argila e uma areia representativas em cada uma das situações de consistência e compacidade, conforme apresentado na Tabela 2.

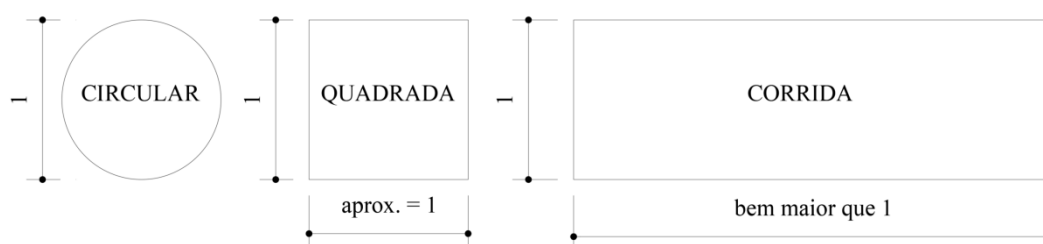
Tabela 2. Caracterização dos solos escolhidos para as verificações.

Argiloso		Arenoso	
Consistência	NSPT	Compacidade	NSPT
Muito mole	2	Fofa	3
Mole	4	Pouco compacta	6
Média	8	Medianamente compacta	12
Rija	16	Compacta	24
Dura	32	Muito compacta	48

Em todos os casos, adotou-se um embutimento de 1,0 m, valor que está em conformidade com as práticas projetuais correntes para fundações rasas (Figura 1). Considerou-se ainda a inexistência de influência do nível d'água, bem como a hipótese de camadas de solo infinitas, ou seja, sem variações de NSPT ou de grau de saturação acima ou abaixo da base da fundação (Bortoli, 2023).

**Figura 1.** Apresentação do embutimento das sapatas (teóricas) investigadas.

Cabe ressaltar que, embora a NBR 6122:2019 (ABNT, 2019) estabeleça que as dimensões mínimas em planta das sapatas não devem ser inferiores a 60 cm, neste estudo foram consideradas sapatas corridas, quadradas e circulares com largura $B = 1,0$ m, a fim de manter a comparabilidade entre os modelos e isolar o efeito geométrico nas análises (Figura 2). Com essas definições, foi possível determinar distintos valores de tensão admissível (σ_{adm}), parâmetro central para a avaliação do comportamento do sistema sapata-solo nas diferentes condições de solo e formato de fundação investigadas.

**Figura 2.** Apresenta a base das sapatas (teóricas) investigadas.

Nos solos argilosos (Tabela 3), as geometrias quadradas e circulares apresentaram resultados iguais de tensão admissível. Esse comportamento é explicado pelo que é proposto por Cintra et al. (2011), que recomendam, para solos argilosos sem ensaios laboratoriais disponíveis, adotar o ângulo de atrito igual a zero ($\phi = 0^\circ$). Nessa condição, apenas os fatores de forma Sc e Sq influenciam no cálculo da capacidade de carga, sendo ambos iguais conforme a Tabela 1, o que justifica o comportamento equivalente do sistema sapata-solo para as formas quadrada e circular. Por outro lado, a sapata corrida, de geometria mais alongada, apresentou tensões admissíveis entre 16,8% (argila muito mole) e 19,7% (argila dura) menores em relação às sapatas isoladas. Observa-se ainda que essa diferença tende a crescer de forma aproximadamente linear, com incremento médio de 0,097% por unidade de NSPT.

Tabela 3. Tensão admissível obtida para solos argilosos.

Consistência	Tensão Admissível (kPa)		
	Corrida	Quadrada	Circular
Muito mole	27,18	31,75	31,75
Mole	50,69	59,83	59,83
Média	119,89	142,73	142,73
Rija	280,47	335,29	335,29
Dura	555,27	664,92	664,92

Em termos de desempenho técnico, portanto, a sapata quadrada pode ser considerada a mais eficiente em solos argilosos, pois oferece a mesma capacidade resistente da circular, mas com execução mais simples. Na comparação entre sapatas quadradas e corridas, desde que o volume de solo escavado para a implantação das quadradas não exceda o das corridas, as sapatas quadradas apresentarão melhor eficiência ambiental e econômica. Essa solução tem sido aplicada em obras com sistemas mistos de alvenaria estrutural, nas quais o pavimento térreo é executado com estrutura tradicional (pilares, vigas e lajes) apoiada em sapatas isoladas, enquanto a alvenaria estrutural inicia-se a partir do primeiro pavimento. Tal configuração permite utilização do térreo como garagem e proporciona uma otimização de materiais, resultando em eficiência ambiental e financeira nas fundações.

Tabela 4. Tensão admissível obtida para solos arenosos.

Compacidade	Tensão admissível (kPa)		
	Corrida	Quadrada	Circular
Fofa	48,51	45,63	42,76
Pouco compacta	54,24	50,93	47,63
Medianamente compacta	130,79	121,31	111,84
Compacta	456,09	416,38	376,66
Muito compacta	2.334,27	2.092,07	1.849,87

Nos solos arenosos (Tabela 4), verifica-se uma tendência inversa: há redução da tensão admissível à medida que o formato da sapata torna-se mais concentrado, passando de corrida para quadrada e, por fim, para circular. Essa diferença se manifesta de maneira

sistemática em todas as classes de compacidade. Em areias fofas, a sapata corrida apresentou tensões admissíveis 6,3% maiores que a quadrada e 13,4% maiores que a circular. Já em areias muito compactas, essas diferenças aumentam para 11,6% e 26,2%, respectivamente. Assim, quanto maior o NSPT, maior é a diferença percentual entre as sapatas corridas e as isoladas. Entre as sapatas isoladas, a forma quadrada supera a circular em aproximadamente 6,7% (areia fofa), chegando a 13,1% (areia muito compacta).

Dessa forma, desde que o tempo de execução, o nível de mão de obra e o uso de equipamentos de escavação não ultrapassem o necessário para as sapatas isoladas, as sapatas corridas se mostram particularmente eficientes em solos arenosos, sobretudo nas compacidades mais elevadas, onde mobilizam maior parcela do atrito interno do solo e, por isso, atingem as maiores tensões admissíveis. Já na comparação entre sapatas quadradas e circulares, sempre que o espaço em planta permitir sua adoção, a sapata quadrada tende a ser a alternativa mais vantajosa: além de simplificar a execução e exigir o mesmo volume de escavação de uma sapata circular, apresenta tensões admissíveis consistentemente superiores - entre 6% e 14% - em todas as compacidades analisadas.

Análise do carbono incorporado nas fundações

As fundações representam uma etapa intensiva em materiais, especialmente concreto e aço, que são responsáveis por parcela significativa das emissões da construção (UNEP, 2022). Dentro da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), as etapas A1 a A5 incluem produção, transporte e execução.

Quanto maior a área da base da sapata, maior o volume de materiais e maior o carbono incorporado. A geometria influencia diretamente esse impacto ambiental.

Relação entre o formato da sapata e o carbono incorporado

Os mecanismos de influência do formato da sapata no carbono incorporado se manifestam principalmente pelo volume de materiais, já que a geometria define a quantidade de concreto necessária; pela eficiência estrutural, pois formatos mais eficientes reduzem materiais mantendo a capacidade resistente; e pelos processos construtivos, que variam em consumo energético conforme a geometria adotada (Miranda et al., 2019).

A redução do carbono incorporado em fundações diretas inicia-se pela busca das maiores tensões admissíveis, seja pela alteração do formato da sapata ou pelo melhoramento do solo, permitindo diminuir a área e a altura da fundação. Embora o concreto predomine em volume, o aço pode se tornar o principal responsável pelo impacto ambiental quando as taxas de armadura são elevadas. Em elementos com taxas entre 1% e 2%, a redução é mais eficaz ao otimizar o volume de concreto por meio de ajustes geométricos; já em taxas entre 3% e 4%, o aço passa a dominar o *Global Warming Potential* (GWP), tornando vantajosas soluções que reduzam a quantidade de armadura ou privilegiem geometrias mais rígidas (Sheng et al., 2024).

Diante disso, quando o aço constitui o principal fator de impacto, a adoção de sapatas rígidas com geometrias que maximizem a tensão admissível, como o formato trapezoidal, pode reduzir simultaneamente concreto e aço, contribuindo para a mitigação do *Global Warming Potential* (GWP).

Considerações finais

As análises realizadas demonstraram que o formato da sapata exerce influência significativa na tensão admissível do solo, variando conforme o tipo de material de fundação. Nos solos argilosos, as sapatas quadradas e circulares apresentaram resultados idênticos, devido à adoção do ângulo de atrito nulo ($\phi = 0^\circ$), enquanto a sapata corrida mostrou valores 16,8% a 19,7% menores, com redução crescente conforme o aumento do

NSPT. Já nos solos arenosos, observou-se tendência oposta: a sapata corrida apresentou as maiores tensões admissíveis, com diferenças de até 26,2% em relação à circular, e a sapata quadrada manteve desempenho intermediário, combinando boa resistência e facilidade executiva.

De forma geral, verificou-se que a eficiência da fundação está relacionada não apenas às propriedades geotécnicas, mas também à geometria da sapata, que influencia diretamente o volume de materiais e o impacto ambiental da obra. Recomenda-se, para estudos futuros, a análise de casos reais a fim de validar os resultados teóricos e a quantificação dos custos energéticos e financeiros envolvidos na execução de diferentes formatos, permitindo uma avaliação mais ampla sob a perspectiva da engenharia sustentável.

A relação entre o formato da sapata e o carbono incorporado revela-se fundamental para a sustentabilidade nas fundações, atuando através de três mecanismos principais de influência: o volume de materiais, onde o formato define diretamente a quantidade de concreto necessário; a eficiência estrutural, que permite que geometrias mais eficientes reduzam materiais mantendo a capacidade de carga; e os processos construtivos, visto que formatos diferentes exigem consumos energéticos variados durante a execução.

Como estratégias de redução destacam-se as sapatas trapezoidais, que eliminam concreto em zonas de baixo esforço preservando o desempenho estrutural; as sapatas flexíveis, que através de menor altura promovem economia significativa de concreto com redução direta da pegada carbônica; e as sapatas rígidas, que em situações específicas permitem reduzir armaduras de aço e material de alta intensidade carbônica.

Em síntese, os resultados obtidos constituem uma base consistente para compreender como os formatos de sapatas - e, conseqüentemente, os fatores de forma consolidados por Terzaghi e Peck (1967) - influenciam simultaneamente a eficiência estrutural e o potencial de mitigação dos impactos ambientais das fundações. Ao modificar diretamente a tensão admissível, esses fatores determinam a área da base necessária, o volume de concreto associado e a quantidade de aço demandada, estabelecendo uma relação direta entre o comportamento geotécnico e o carbono incorporado do sistema sapata-solo. O estudo, portanto, se apresenta como um direcionador para decisões projetuais mais racionais, uma vez que diferentes geometrias podem resultar em emissões significativamente distintas mesmo sob a mesma carga aplicada.

Entretanto, os resultados aqui apresentados baseiam-se em condições idealizadas - solo homogêneo, carga centrada, ausência de lençol freático e inexistência de interferências entre fundações - que não representam a realidade completa dos canteiros de obra. As situações como cargas excêntricas, variação do grau de saturação, interação entre sapatas e presença de vigas baldrame podem alterar a distribuição de tensões e exigir adaptações geométricas que impactam diretamente o volume de materiais e, por consequência, o carbono incorporado. Assim, torna-se essencial avançar para estudos que explorem, de forma aplicada, como os fatores de forma existentes se comportam frente a essas condições reais e de que maneira influenciam o desempenho ambiental das fundações.

Recomenda-se, para aprofundamento, a realização de investigações que quantifiquem com maior precisão a relação entre formato da sapata, área requerida e volume final de materiais, utilizando métodos robustos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e bases regionais de Declarações Ambientais de Produto (DAPs). Estudos futuros também devem considerar aplicações em cenários reais, com cargas excêntricas ou interações entre fundações, para verificar como adaptações geométricas impostas pelo projeto alteram o carbono incorporado mesmo quando se utilizam os mesmos fatores de forma clássicos. Nesse contexto, ferramentas de classificação como o SCORS podem auxiliar na comparação de soluções estruturais equivalentes, permitindo identificar

configurações que conciliem melhor desempenho técnico e menor impacto ambiental. Esses avanços permitirão consolidar diretrizes práticas que integrem geotecnia e sustentabilidade sem a necessidade de alterar ou recalibrar os fatores de forma já consagrados pela literatura.

Conflitos de interesses

Os autores declaram não haver interesses concorrentes ou relações pessoais conhecidas que possam ter influenciado as inferências relatadas neste artigo.

Referências

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6122 - Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

Arnold, W.; Cook, M.; Cox, D.; Gibbons, O.; Orr, J. Setting carbon targets: An introduction to the proposed SCORS rating scheme. **The Structural Engineer**, v. 98, n. 10, p. 8-12, 2020. Disponível em: <<https://www.istructe.org/IStructE/media/Public/TSE-Archive/2020/Setting-carbon-targets-an-introduction-to-the-proposed-SCORS-rating-scheme.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2025.

Barros, I. R. **Análise de impactos ambientais causados pela utilização de estacas do tipo raiz na construção de linhas de transmissão de energia**. Manaus: Universidade Federal do Amazonas, 2021. (Dissertação de mestrado).

Borges, J. P. S. **Reabilitação construtiva e estrutural de uma habitação para fins socioculturais múltiplos**. Porto: Universidade do Porto, 2016. (Dissertação de mestrado).

Bortoli, L. H. Avaliação da estabilidade global de edifícios de concreto armado considerando interação solo-estrutura. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 19, n. 2, p. 272-284, 2023. <https://doi.org/10.5216/reec.v19i2.64707>

Brás, C. **A prática de uma arquitetura consciente**. O caso prático de uma habitação na Maia. Porto: Universidade do Porto, 2024. (Dissertação de mestrado).

Calado, B. F. **Arquitetura Nova Era: residência de baixo impacto ambiental na Região Metropolitana de Natal**. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2018. (Trabalho de conclusão de curso).

CEN - European Committee for Standardization. **EN 15804: Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products**. Brussels: European Committee for Standardization, 2012.

Cintra, J. C. A.; Aoki, N. **Fundações por sapatas: projeto geotécnico**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

Cintra, J.; Aoki, N.; Albiero, J. H. **Projeto geotécnico de fundações diretas**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

Hák, T.; Janoušková, S.; Moldan, B. Sustainable Development Goals: A need for relevant indicators. **Ecological Indicators**, v. 60, p. 565-573, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.08.003>

Ige, O. E.; Von Kallon, D. V.; Desai, D. Carbon emissions mitigation methods for cement industry using a systems dynamics model. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 26, p. 579-597, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02683-0>

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

Mello, T. C. **Geotecnia e fundações**: soluções de obras em zonas urbanas. Tomar: Instituto Politécnico de Tomar, 2021. (Relatório de projeto).

Miranda, B. T. S.; Santos, C. J. R.; Lima, D. A.; Silva Júnior, E. R.; Batista, L. S.; Ferreira, M. L. M.; Oliveira, M. A. A. Estudo do comportamento mecânico do concreto a partir da utilização de RCD como agregado graúdo. In: Abdala, M. R. W. S. (Org.). **Impactos das tecnologias na Engenharia Civil 4**. Ponta Grossa: Atena, 2019. p. 271-287. (Impactos das tecnologias na Engenharia Civil; v. 4). <https://doi.org/10.22533/at.ed.43319200821>

Pereira, J. T. O. **Diferente das emissões operacionais, que ocorrem durante a utilização do edifício, o carbono incorporado é “trancado” na estrutura antes de sua ocupação**. Porto: Instituto Politécnico do Porto, 2023. (Dissertação de mestrado).

Santos, I. G. **Análise comparativa de tensões de tração pelos métodos MBT e MEF em bloco sobre 4 estacas metálicas**. Balsas: Universidade Federal do Maranhão, 2025. (Trabalho de conclusão de curso).

Sheng, K.; Woods, J. E.; Bentz, E.; Hoult, N. A. Assessing embodied carbon for reinforced concrete structures in Canada. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 51, n. 8, p. 829-840, 2024. <https://doi.org/10.1139/cjce-2023-0345>

Sousa, W. L. **Modelo em aprendizagem de máquina para previsão de capacidade de carga de fundações diretas**. Crateús: Universidade Federal do Ceará, 2023. (Trabalho de conclusão de curso).

Souza, L. R.; Marco, G. Caracterização do solo na escolha da fundação. **RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar**, v. 5, n. 1, e516078, 2024. <https://doi.org/10.47820/recima21.v5i1.6078>

Terzaghi, K. **Theoretical soil mechanics**. New York: John Wiley and Sons, 1943.

Terzaghi, K.; Peck, R. B. **Soil mechanics in engineering practice**. New York: John Wiley and Sons, 1967.

UNEP - United Nations Environment Programme. **2022 Global Status Report for Buildings and Construction**. Nairobi: UNEP, 2022. Disponível em: <<https://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction>>. Acesso em: 10 fev. 2025.

Velloso, D. A.; Lopes, F. R. **Fundações**: Volume 1 - Solos e fundações superficiais. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.



Informação da Licença: Este é um artigo Open Access distribuído sob os termos da Licença Creative Commons Attribution, que permite uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que a obra original seja devidamente citada.