

Influência combinada da largura e da distância entre eixos na sobreposição do bulbo de tensões de duas sapatas corridas

Jaime Carlos Renck Neto

Estudante de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, Brasil,
jaimerenck.aluno@unipampa.edu.br

Raquel Mariano Linhares

Docente do Magistério Superior, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, Brasil,
raquellinhares@unipampa.edu.br

Diego Arthur Hartmann

Docente do Magistério Superior, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, Brasil,
diegohartmann@unipampa.edu.br

Rafael Oliveira Mendonça

Engenheiro Civil e Técnico Judiciário, Tribunal de Justiça da Bahia, Camaçari, Brasil,
rafaeloliveiram1@gmail.com

RESUMO: Neste trabalho, analisou-se a influência da sobreposição do bulbo de tensões da fundação de um edifício a ser construído sobre a de um edifício pré-existente, por meio de modelos numéricos. Ambas as fundações eram em sapata corrida assente em solo arenoso fofo homogêneo. Validou-se o modelo numérico por meio de modelos físicos em escala reduzida e, após, realizou-se análise paramétrica para melhor compreender o efeito nos recalques observados no edifício pré-existente entre parâmetros geométricos combinados, como a largura das sapatas ($B = 1$ e 2 m) e a distância entre seus eixos ($D = 2, 3, 4, 6$ e 8 m). Foram obtidos os recalques absolutos em ambas as sapatas e calculados os recalques diferenciais e distorcionais no edifício pré-existente para cada cenário analisado, admitindo-se distância entre fundações também variáveis ($L = 10, 15$ e 20 m). Os resultados indicaram que uma menor D acarreta a sobreposição dos seus bulbos de tensões, implicando no aumento das tensões sob elas e maior incremento de recalques. Nas condições deste trabalho, não houve incremento de deslocamentos significativos nas sapatas de $B = 2$ m, para D maior que 6 metros. Dependendo das condições analisadas, a homogeneidade do substrato e da dimensão da fundação do edifício pré-existente, a construção de uma nova estrutura pode comprometer a estabilidade, causando danos estruturais críticos.

PALAVRAS-CHAVE: Bulbo de Tensão, Fundações Superficiais, Sapata Corrida, Recalque.

ABSTRACT: In this paper, the influence of the pressure bulb of a new building's foundation on that of a pre-existing building was analyzed through numerical models. Both foundations were assumed to be strip footings on loose, homogeneous sandy soil. The numerical model was validated with results from a reduced-scale experimental program. Subsequently, a parametric analysis was conducted to better understand the effects of combined geometric parameters on the settlements of the pre-existing building, such as the footing width ($B = 1$ and 2 m) and center-to-center distance between footings ($D = 2, 3, 4, 6$ and 8 m). Absolute settlements were obtained for both footings, and differential and distortional settlements of pre-existing building were calculated for each scenario, considering variable distance between its footings ($L = 10, 15$ and 20 m). Results indicated that reducing the distance between foundations (D) leads to an overlap of their stress bulbs, increasing both stresses beneath them and observed settlements. No significant increase in settlements was observed for D greater than 4 meters. Depending on the analyzed conditions – such as soil homogeneity and the dimensions of the pre-existing foundation – the construction of a new building can compromise stability and lead to critical structural damages.

KEYWORDS: Pressure bulb, Shallow Foundations, Strip footing, Settlements.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos 60 anos, o Brasil passou por um processo de transformação demográfica, tornando-se um dos países mais populosos do mundo. Esse crescimento populacional, combinado com a urbanização, gerou uma elevada demanda por habitação nos centros urbanos do país. Com o aumento na busca por terrenos, principalmente em áreas urbanas, fez-se necessário aumentar a capacidade de abrigar pessoas em uma mesma área; logo, os edifícios de múltiplos andares se tornaram a solução mais eficiente para atender esta demanda. Essas edificações, além de terem se tornaram cada vez mais próximas umas das outras, possuem peso próprio maior do que residências unifamiliares, implicando em maiores valores de tensão no solo.

Todas as fundações sofrem recalques, contudo, só há dano na estrutura quando sua magnitude é maior que as admissíveis. A NBR 6122 (ABNT, 2019) define os seguintes tipos de recalque: (i) recalque absoluto (ρ) (ou recalque total) é o deslocamento vertical absoluto em um ponto específico no elemento estrutural de fundação; (ii) recalque diferencial (δ) é a diferença entre o recalque absoluto de dois pontos distintos da fundação e (iii) recalque diferencial específico (ou distorção angular) (β) é o recalque diferencial entre dois apoios dividido pela distância entre estes. Velloso e Lopes (2011) apresentam a Figura 1 que associa valores de distorção angular com possíveis danos na edificação, sugeridos por Bjerrum (1963) e complementados por Vargas e Silva (1973).

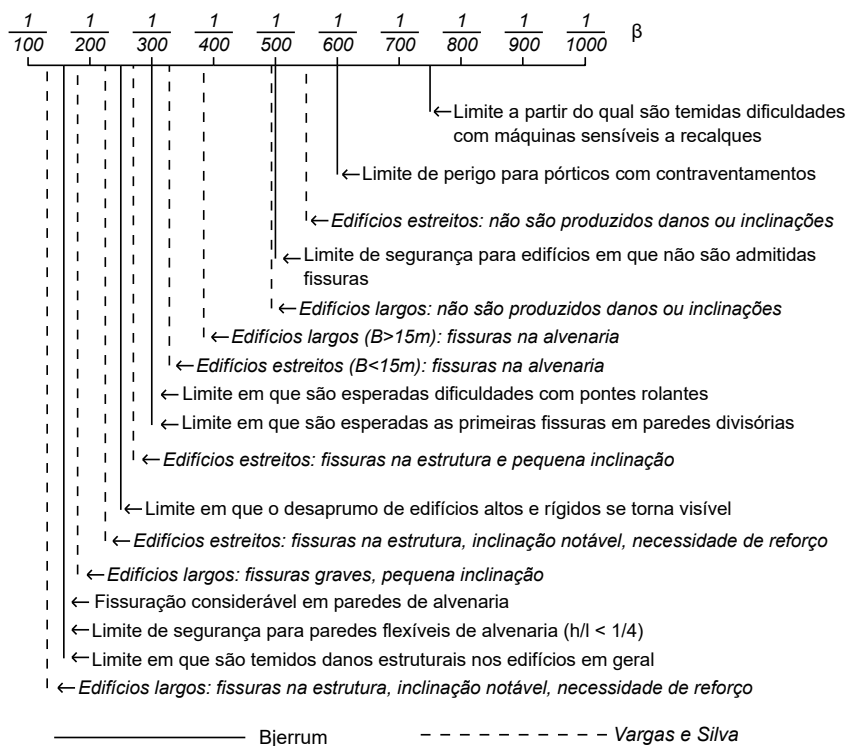


Figura 1. Distorções e danos associados (Velloso e Lopes, 2011).

Além disso, fatores como o tipo de solo e a proximidade entre as fundações podem alterar de forma significativa o campo de tensões e recalques associados, exigindo a consideração de interações estruturais e rotacionais (Kassas et al., 2022), devido à sobreposição dos bulbos de tensões de suas fundações. Estudos recentes em modelos numéricos têm contribuído para o avanço no entendimento do comportamento de fundações adjacentes, integrando abordagens analíticas, métodos de elementos finitos e validação experimental em campo (Zeng et al., 2022). Salari et al. (2024), por exemplo, indicam que fundações de sapata próximas tendem a apresentar variação de capacidade de carga e redistribuição de recalques, sobretudo em solos granulares.

Logo, analisar os recalques em uma edificação pré-existente ocasionados pela construção de uma nova edificação é de grande interesse da Engenharia Geotécnica, tornando a previsibilidade indispensável para o adequado dimensionamento estrutural de fundações e movimentações do solo. Tendo isso em vista, objetiva-se com este trabalho estudar a interação e a influência de bulbos de tensões de duas sapatas corridas rígidas de

edifícios distintos (um pré-existente e um a ser construído), variando-se parâmetros geométricos, como as larguras das sapatas e as distâncias entre seus eixos, associando os recalques observados com os danos previstos em cada situação. Este estudo foi conduzido por meio de modelos numéricos desenvolvidos em software de análise de elementos finitos geotécnico, validado por meio de um programa de modelos físicos conduzido em laboratório em escala reduzida.

2 METODOLOGIA

2.1 Validação do modelo numérico e parâmetros utilizados

Os modelos numéricos deste trabalho foram validados com modelos físicos em escala reduzida realizados por Linhares (2013) no laboratório de Geotecnia da FEC/UNICAMP, constituídos de uma sapata corrida rígida, portanto admitindo-se estado plano de deformações, assente em solo arenoso fofo homogêneo, carregada uniformemente por meio de pórtico de reação. A partir do programa experimental, conduzido com repetibilidade de três ensaios para a mesma condição, foram produzidas curvas tensão-recalque com deslocamentos variando de 5% a 30% da largura do modelo da sapata reduzida, e apresentada a curva tensão-recalque média.

O modelo numérico foi reproduzido em uma escala 10 vezes maior que as dimensões do modelo físico, para melhor integração numérica, respeitando o efeito escala (Dell'avanzi et al., 2006). A sapata foi modelada como elemento “placa” de alta rigidez. Todas as dimensões do modelo de validação e restrições de movimentação impostas podem ser visualizadas na Figura 2.

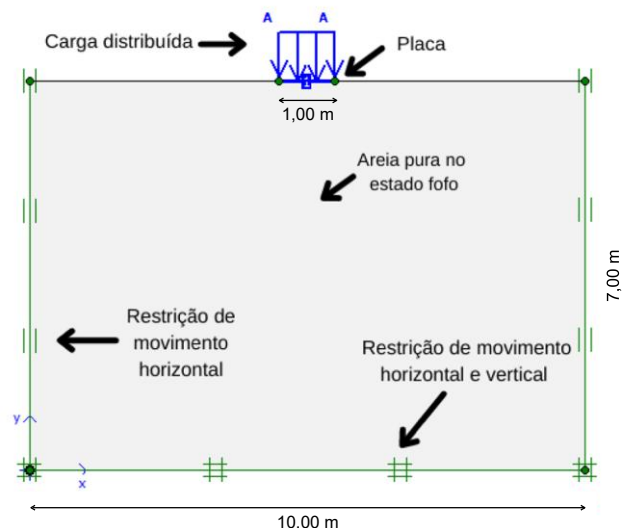


Figura 2. Dimensões do modelo numérico.

A partir dos parâmetros geotécnicos do modelo físico, obtidos por meio de ensaios laboratoriais, e de dados da literatura (Marangon, 2017), validaram-se os parâmetros geotécnicos do modelo numérico (Figura 3). Também foi conduzido um estudo de sensibilidade de malha, variando-se o número de elementos da malha, por meio do seu refinamento global (extra fina, fina, média e grosseira) e o número de nós por elemento triangular (6 e 15 nós). Os desvios médios entre valores da curva tensão-recalque média obtida por meio dos modelos físicos e da curva tensão-recalque do modelo numérico foram de 0,6%, valor considerado aceitável. Os parâmetros geotécnicos, estruturais e numéricos utilizados se encontram na Tabela 1.

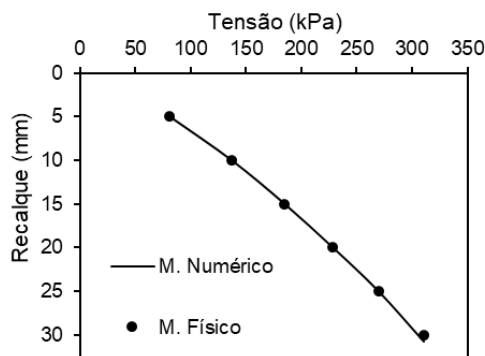


Figura 3. Comparativo entre média do programa experimental (modelo físico reduzido) e modelo numérico.

Tabela 1. Parâmetros utilizados no modelo numérico.

Parâmetro	Valor
γ_{nat} (kN/m ³)	14,54
E_{solo} (kPa)	3795
coesão (kPa)	2
ν (coeficiente de Poisson do solo)	0,23
Ψ (ângulo de dilatância do solo)	6,35°
Φ (ângulo de atrito do solo)	33°
Refinamento da malha	Grossa
Quantidade de nós por elemento	15

2.2 Análise paramétrica

Foram desenvolvidos seis modelos numéricos, compostos por duas sapatas rígidas, submetidas a carregamentos em etapas distintas, representando as sapatas limítrofes de um edifício pré-existente (SE) e de um edifício a ser construído (SD). Foram analisadas diferentes larguras de sapatas ($B = 1$ e 2 m) e distâncias entre seus eixos ($D = 2, 3, 4, 6$ e 8 m), conforme ilustrado na Figura 4. Para calcular a distorção angular, considerou-se que as demais sapatas do edifício pré-existente permaneceram intactas e variou-se a distância entre a sapata afetada e a sapata intacta (SI), analisando três possíveis casos ($L = 10, 15$ e 20 m).

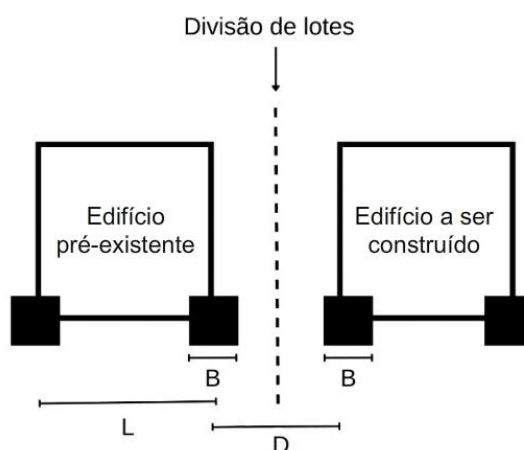


Figura 4. Protótipo estudado.

Como o modelo físico de referência considerava apenas uma fundação, ajustaram-se os limites geométricos do modelo numérico, fixando o comprimento horizontal em 30 metros, para acomodar o caso de maior distância entre eixos ($D = 8$ m) e maiores larguras de sapatas ($B = 2$ m), evitando efeitos de borda e ausência de recalques nas extremidades. Já a altura do modelo foi fixada em 15 metros, conforme a

recomendação de Cintra et al. (2011), que estimam 4 vezes a largura da sapata (4B) para sapatas corridas. As dimensões finais dos modelos numéricos podem ser visualizadas na Figura 5.

A análise paramétrica foi dividida em dois grupos distintos (A e B), de acordo com a largura das sapatas, variando D e B de forma a manter a razão B/D em ambos os grupos. As sapatas foram carregadas em estágios com tensões dentro do intervalo do modelo físico reduzido (respeitando-se o efeito escala), sendo: 100, 150, 200 e 250 kPa. O carregamento foi realizado em 8 fases, sendo as fases de 1 a 4 referentes ao carregamento da sapata esquerda (edifício pré-existente) e as fases de 5 a 8 referentes ao carregamento da sapata direita (edifício a ser construído).

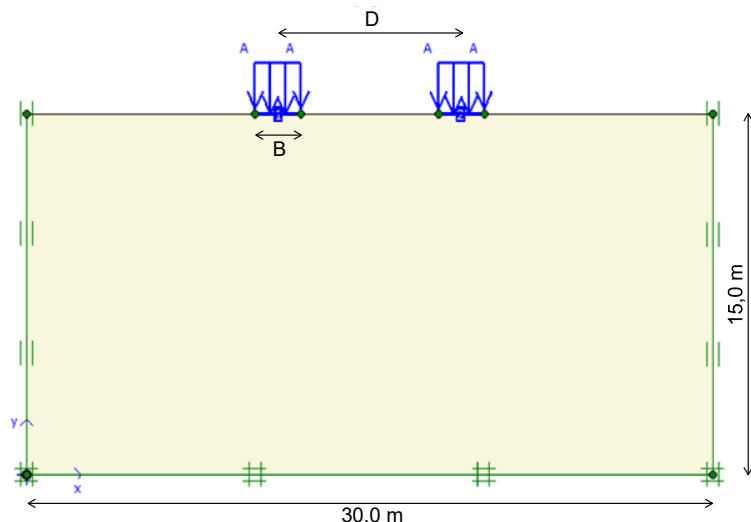


Figura 5. Ilustração do caso com maior distância entre sapatas.

Tabela 2. Resumo da análise paramétrica.

Grupo	B (m)	D (m)	Nome do Modelo	B/D
A	1	4	M1	0,25
		3	M2	0,33
		2	M3	0,50
		8	M4	0,25
B	2	6	M5	0,33
		4	M6	0,50

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Recalques

Foram extraídos do software os recalques máximos obtidos em cada sapata durante cada fase de carregamento. Os recalques foram considerados diferenciais em relação à sapata intacta (SI) e normalizados por meio da divisão pela largura da sapata (B). Como o edifício pré-existente já houvera sofrido recalques devidos a sua própria construção, foram analisados os incrementos de recalque devidos à construção do novo edifício. Os resultados de ambos os grupos, bem como uma comparação entre modelos dos Grupos A e B com mesma razão D/B, podem ser observados na Figura 6.

É possível perceber que os maiores incrementos de recalques na Sapata Esquerda (SE – edifício pré-existente) se deram com os menores valores de D, em ambos os grupos (M3 e M6). O contrário também é válido; os menores valores de incrementos em SE se deram com os maiores valores de D, em ambos os grupos (M1 e M4). Os modelos com mesma razão D/B apresentaram inclinação de curva e incremento de recalques similares, o que já era esperado devido à normalização das características geométricas.

Os modelos com maiores razões D/B (M1 e M4) apresentaram incremento de recalques em SE 16,9% e 7,5%, respectivamente, sendo os menores de cada respectivo grupo. Já nos modelos de menores razões D/B

(M3 e M6), os incrementos de recalque em SE, foram de 38,3% e 25,6%, sendo os maiores valores de cada respectivo grupo, como era previsto.

Não foram observadas diferenças significativas entre as curvas de recalques da SE para os modelos do Grupo B com maiores valores de D (M5 M6) durante o carregamento da SD (fases 5 a 8), indicando que, para sapatas corridas rígidas com 2 m de largura assentes sobre solo arenoso fofo homogêneo, a distância máxima de sobreposição de bulbos é 6 m. Contudo, os resultados do Grupo A levam a crer que apenas a razão D/B não é suficiente para se determinar se haverá ou não sobreposição de bulbos, devendo ser analisada conjuntamente o valor absoluto da largura da sapata.

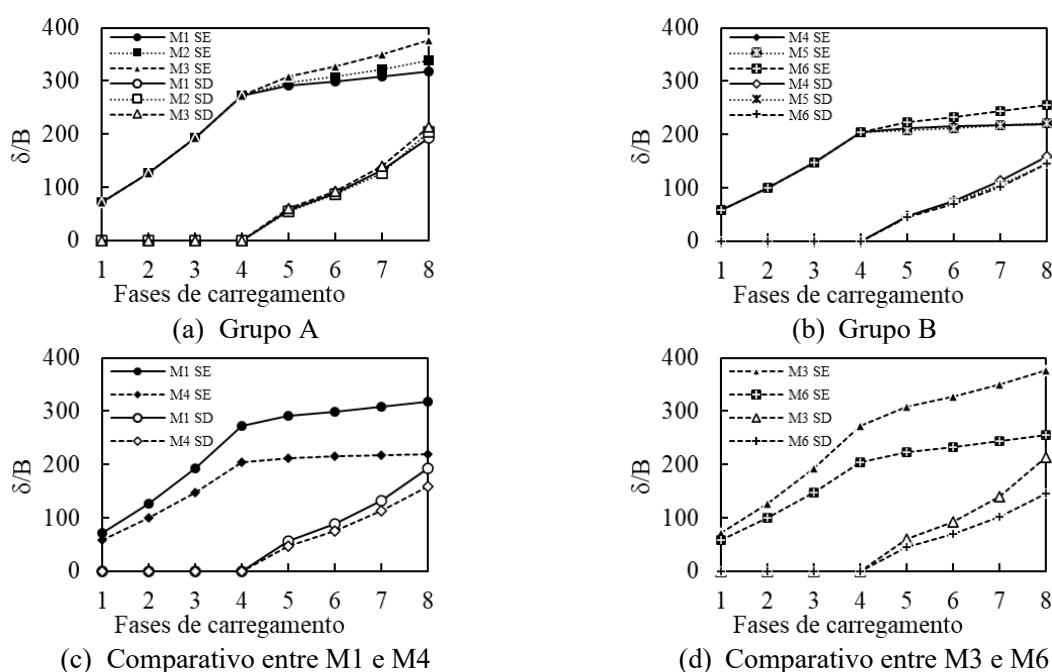


Figura 6. Ilustração do caso com maior distância entre elementos.

É importante ressaltar que utilizou-se solo arenoso fofo com necessidade de reforços no programa experimental base da validação dos modelos numéricos. A não utilização de reforços no presente trabalho justifica os valores dos recalques observados.

3.2 Distorção Angular

Para estudar possíveis danos ao edifício pré-existente causados por distorção angular, escolheu-se o modelo que apresentou o maior valor de recalque normalizado (M3) e calcularam-se as distorções angulares entre a sapata intacta (SI) e a sapata esquerda do modelo numérico (SE), para dois casos. No primeiro caso, realista, admitiu-se que o recalque de SI foi igual à fase 4 de M3 (recalques advindos de sua própria construção); no segundo caso, crítico, admitiu-se que a sapata intacta não sofreu qualquer tipo de recalque. Os resultados da distorção angular estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Distorção angular para diferentes distâncias entre sapatas do edifício pré-existente.

ρ_{SE} (m)	ρ_{SI} realista (m)	ρ_{SI} crítico (m)	L (m)	δ/L realista	δ/L crítico
0,376	0,272	0,00	10	1/100	19/500
0,376	0,272	0,00	15	7/100	1/40
0,376	0,272	0,00	20	1/200	19/1000

Para o caso realista e maiores distâncias entre sapatas (15 e 20 m), a distorção angular atingiu a marca de 1/200 da Figura 1, apontando possibilidade de danos estruturais em geral no edifício. Para a menor distância



analisada (10 m), a distorção angular observada foi do nível mais crítico da Figura 1, incluindo danos estruturais como fissuras na estrutura, inclinação notável e necessidade de reforço em edifícios largos.

Já para o caso crítico, a construção de uma nova edificação atingiu o limite mais severo da tabela para qualquer valor de L, tornando necessário o emprego de reforço estrutural.

4 CONCLUSÃO

Os resultados demonstram que a construção de uma nova edificação adjacente a um edifício pré-existente pode acarretar em acréscimos consideráveis nos recalques das fundações já existentes. Este efeito é decorrente da sobreposição dos bulbos de tensão ocorridos no solo e parece não depender unicamente da razão entre a distância entre eixos e a largura das sapatas, mas também do valor absoluto da largura das sapatas. Parâmetros geotécnicos que não foram escopo deste trabalho, como a heterogeneidade e a rigidez do solo, também podem interferir nos recalques observados. A distorção angular entre as sapatas rígidas da edificação pré-existente, resultante da sua própria construção e/ou da construção de edifícios vizinhos, atingiu limite crítico em ambos os casos analisados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). NBR 6122/Emenda 1:2022. *Projeto e Execução de Fundações*. Rio de Janeiro.
- Bjerrum, L. (1963) Allowable settlement of structures. *Proceedings European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Germany: Wiesbaden.
- Cintra, J. C. A., Aoki, N. & Albiero, J.H. (2011) *Fundações Diretas: Projeto Geotécnico*. São Paulo: Oficina De Textos.
- Dell'Avanzi, E.; Bernardes, G. P.; Godoy, H.; Jarrouges, H. (2006) Estudo do Comportamento de Estruturas Grampeadas Utilizando Modelos Reduzidos: Conceitos Teóricos para Garantia da Similitude Modelo-Protótipo. *XIII COBRAMSEG*. Curitiba: ABMS.
- Kassas, K., Adamidis, O., Anastasopoulos, I. Structure–soil–structure interaction (SSSI) of adjacent buildings with shallow foundations on liquefiable soil. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, v. 51, n. 12, p. 3067-3086, 2022. <https://doi.org/10.1002/eqe.3728>.
- Linhares, R. M. (2013) *Uso de reforço em geotêxtil com posicionamento não-planar para fundação superficial em solo arenoso fofo*. 2013. Tese (Mestrado em Geotecnia) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, Campinas.
- Marangon, M. (2017) *Parâmetros dos solos para cálculo de fundações*. Juiz de Fora: UFJF.
- Salari, M., Lezgy-Nazargah, M., Shafaie, V., Movahedi Rad, M. Numerical study of the ultimate bearing capacity of two adjacent rough strip footings on granular soil subjected to different rotational and horizontal displacement constraints. *Buildings*, v. 14, n. 6, p. 1653, 2024. <https://doi.org/10.3390/buildings14061653>.
- Velloso, D. A., Lopes, F. R. (2011) *Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas. Vol. completo*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Vargas, M.; Silva, F. R. (1973) O problema das fundações de edifícios altos: experiência em São Paulo e Santos. *Conferencia Regional Sul-Americana Sobre Edifícios Altos*. Anais. Porto Alegre.
- Zeng, F., Li, W., Xiao, X., Huang, H., Wang, J. Calculation of surface settlement and pile foundation deformation caused by shield machine tunnelling along curve section. *Frontiers in Built Environment*, v. 8, 2022. DOI:10.3389/fevo.2022.1019785.