

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/275

Análise Experimental de Sapatas Isoladas em Solo Colapsível sob Diferentes Condições de Umidade e Pré-carregamento.

Bárbara Estéfany Pereira

Mestranda em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, barbara.pereira.2016@hotmail.com

Eduardo Augusto dos Santos Oliveira

Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, santosoliveiracivil@gmail.com

Jean Rodrigo Garcia

Professor Doutor, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, jean.garcia@ufu.br

RESUMO: O estudo das fundações em solos colapsíveis em estado inundado torna-se cada vez mais crucial para enfrentar os desafios específicos apresentados por esse tipo de solo, garantindo a segurança e estabilidade das construções nessas condições. Nesse contexto, este artigo analisa o comportamento de uma sapata isolada, com 0,20 m de altura e 1 m de diâmetro, em solo colapsível de Uberlândia (MG) previamente inundado e sem pré-carregamento, comparando-a com outra sapata idêntica testada por outro autor, que realizou o pré-carregamento seguido da inundação. Ambas foram submetidas à compressão axial por meio de prova de carga estática e lenta. Com base nos resultados obtidos, constatou-se uma diminuição na tensão de ruptura das sapatas quando submetidas a ensaios no estado inundado, em comparação com as sapatas testadas em seu estado natural. A redução foi de 24% quando a inundação ocorreu após o pré-carregamento e de 64% quando a sapata já estava inundada desde o início do primeiro carregamento. Além disso, ao analisar as curvas tensão vs. recalque, observou-se que a sapata em estado inundado, sem pré-carregamento, apresentou uma tensão de ruptura inferior em relação à mesma sapata ensaiada após o pré-carregamento, com uma queda de aproximadamente 53%. Esses resultados demonstram que a prática do pré-carregamento em solos colapsíveis contribui para a melhoria do solo, pois tal prática aumenta a tensão de ruptura devido à redução dos vazios no solo, evitando danos maiores as construções.

PALAVRAS-CHAVE: Sapata isolada, solos colapsíveis, prova de carga estática, curva tensão vs recalque.

ABSTRACT: The study of foundations in flooded collapsible soils is becoming increasingly crucial to address the specific challenges presented by this type of soil, ensuring the safety and stability of constructions under these conditions. In this context, this article analyzes the behavior of a single footing, 0.20 m in height and 1 m in diameter, in previously flooded collapsible soil from Uberlândia (MG) without preloading, comparing it with another identical footing tested by another author, who performed preloading followed by flooding. Both were subjected to axial compression through static and slow load testing. Based on the results obtained, a decrease in the bearing capacity of the footings was observed when subjected to tests in the flooded state, compared to the footings tested in their natural state. The reduction was 24% when the flooding occurred after preloading and 64% when the footing was already flooded from the beginning of the first loading. Furthermore, by analyzing the stress vs. settlement curves, it was observed that the footing in the flooded state, without preloading, showed a lower bearing capacity compared to the same footing tested after preloading, with a decrease of approximately 53%. These results demonstrate that the practice of preloading in collapsible soils contributes to soil improvement, as this practice increases the ultimate bearing capacity by reducing the voids in the soil, preventing greater damage to constructions.

KEYWORDS: Single footing, collapsible soils, static load test, stress vs settlement curve.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a implantação de fundações em diversos tipos de construções é comumente realizada utilizando elementos rasos, como radier e sapatas, apoiados diretamente no solo. Entretanto, essa prática generalizada tem levado ao surgimento de patologias relacionadas a estas fundações quando assentes em solos colapsíveis, especialmente quando expostos ao aumento de umidade. De acordo com o mapeamento geológico feito pelo Projeto Triângulo Mineiro, desenvolvido pela CODEMIG/IGC-CPMTC-UFMG (2017) e também conforme os estudos desenvolvidos por Oliveira (2022), em Uberlândia, no Triângulo Mineiro, a extensão territorial é caracterizada por solos lateríticos de baixa capacidade de suporte e alta suscetibilidade a deformações, principalmente em decorrência da elevação do teor de umidade, o que pode resultar em colapso estrutural, causando desde fissuras até danos graves em construções. Com base nisso, é indispensável que sejam realizadas análises específicas desses solos antes da implantação de fundações. Nesse sentido, a realização de provas de carga, que é um ensaio *in situ*, permite analisar a interação entre a fundação e o solo de sustentação.

É de conhecimento comum que todas as fundações tendem, inevitavelmente, a sofrer recalques durante e após a conclusão do empreendimento em que estas estão empregadas. Esses recalques podem variar de acordo com o nível das tensões que são dissipadas nas fundações e da deformabilidade do solo em que estão assentadas. Com base no estudo prévio das características locais e de projeto, esses recalques são considerados esperados e tendem a estabilizar-se ou até mesmo cessar após um determinado período de tempo. Entretanto, existe um tipo especial de recalque denominado “recalque por colapso”, que pode ocorrer em solos colapsíveis.

Devido as suas características de saturação, porosidade e alto índice de vazios, os solos colapsíveis podem, de acordo com Cintra e Aoki (2009) sofrer uma espécie de colapso de sua estrutura em consequência do aumento do seu teor de umidade ou grau de saturação, quando mantida a tensão aplicada, o que produz o fenômeno de colapso, ocasionando recalques repentinos que são somados aos recalques normais, sofrendo uma espécie de colapso de sua estrutura. Esses recalques de colapso podem surgir em qualquer momento durante a vida útil da obra, e sua ocorrência depende apenas da presença de uma fonte de água capaz de inundar o solo em que a fundação está assentada, provocando a dissipação da sucção matricial do solo, anulando a parcela de coesão “aparente” e, portanto, reduzindo significativamente a resistência ao cisalhamento o que provoca o colapso da sua estrutura. Quando somados aos recalques normais, esses recalques de colapso podem causar danos às edificações caso ultrapassem os limites admissíveis estabelecidos em projeto.

A norma de fundações ABNT NBR 6122:2019 destaca que, no caso de solos colapsíveis, é necessário considerar a possibilidade de encharcamento, que pode ocorrer devido a fatores como vazamentos em tubulações de água ou elevação do lençol freático, entre outros. Além disso, a norma prescreve que essas características devem ser levadas em conta tanto no projeto quanto no método construtivo.

Assim, ressalta-se a importância do estudo experimental do comportamento de fundações sob diferentes condições de umidade e pré-carregamento, a fim de contribuir na compreensão do desempenho de fundações assentes em solos colapsíveis.

2 TENSÃO DE RUPTURA

Ao longo dos anos, diversos estudos realizados por meio de provas de carga em placa juntamente com medições de sucção apontaram que a tensão de ruptura de fundações executadas em solos colapsíveis sofrem influência direta da sucção matricial, resultando em uma perda de resistência com o aumento do teor de umidade do solo, gerando uma diminuição dessa sucção.

Costa (1999), também por meio de ensaios em provas de carga em placa com 80 cm de diâmetro do tipo lentas (*Slow Maintained Load* - SML) e rápidas (*Quick Maintained Load* - QML), evidenciou o aumento da tensão de ruptura devido ao aumento da sucção.

Em fundações rasas, ao avaliar o efeito da sucção em placas com 20 cm, 40 cm, 80 cm e 150 cm de diâmetro, Vianna, Cintra e Aoki (2007) identificaram relações importantes entre o aumento da carga admissível da placa e a sucção matricial do solo, assim como os ensaios feitos com a inundação do solo indicaram aspectos do comportamento deste frente a situação de colapsibilidade.

Oliveira (2022) por meio de provas de carga estática realizadas em Uberlândia – MG no solo em seu estado natural e inundado em três tipos de fundações (estaca isolada, sapata isolada e sapata estaqueada),

observou reduções na tensão de ruptura de estacas da ordem de 35% a 50% com aplicação de inundação em solos colapsíveis quando comparados a situação natural.

Por meio da curva tensão vs recalque, se faz possível determinar a tensão admissível do solo (σ_{adm}) para um recalque admissível ou tolerável de acordo com as características da superestrutura. Segundo Albuquerque e Garcia (2020), esta determinação deve ser fixado pelo valor mais desfavorável dentre os seguintes critérios:

Critério de ruptura:

$$\sigma_{adm} \leq \frac{\sigma_{rup}}{FS} \quad (FS \geq 2) \quad (1)$$

Caso não ocorra ruptura:

$$\sigma_{adm} \leq \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{FS} \quad (FS \geq 2) \quad (2)$$

É possível utilizar também o critério amplamente aplicado e conhecido no meio técnico de obras da cidade de Boston, como relatado por Teixeira e Godoy (2016):

$$\text{Critério de recalque: } \sigma_{adm} \leq \begin{cases} \sigma_{10\text{ mm}} \\ \frac{\sigma_{25\text{ mm}}}{2} \end{cases} \quad (3)$$

Onde: $\sigma_{10\text{ mm}}$ é a tensão verificada na curva tensão vs recalque para um recalque de 10 mm e $\sigma_{25\text{ mm}}$ é a tensão verificada na curva tensão vs recalque para um recalque de 25 mm.

3 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

As fundações em estudo foram executadas no Campo Experimental de Mecânica dos Solos e Fundações (CEMSF) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), no Campus Santa Mônica, na cidade de Uberlândia, MG. Com o intuito de conhecer as características mecânicas das camadas do solo local foram realizadas sondagens de simples reconhecimento (SPT) e de Penetrômetro Dinâmico Leve (DPL) resultando nos valores indicados na Figura 1. Além das sondagens, Oliveira (2022) desenvolveu outras investigações geotécnicas para caracterização do solo e testes de carga *in situ* em modelos reais que geraram os parâmetros indicados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros do solo

Material	Camada	Peso específico (γ_{nat}) [kN/m ³]	Coesão (c) [kPa]	Ângulo de Atrito (ϕ) [°]	Módulo de Young (E) [MPa]	Coefficiente de Poisson (ν) [-]	Teor de umidade - Natural (w) (%)	N _{SPT} méd (golpes)	DPLméd (golpes)
Areia argilo-siltosa	1	16	9	23	12	0,35	9	2	7
Areia argilosa com pedregulhos	2	16	9	23	12	0,35	12	6	17

Fonte: Adaptado de Oliveira (2022)

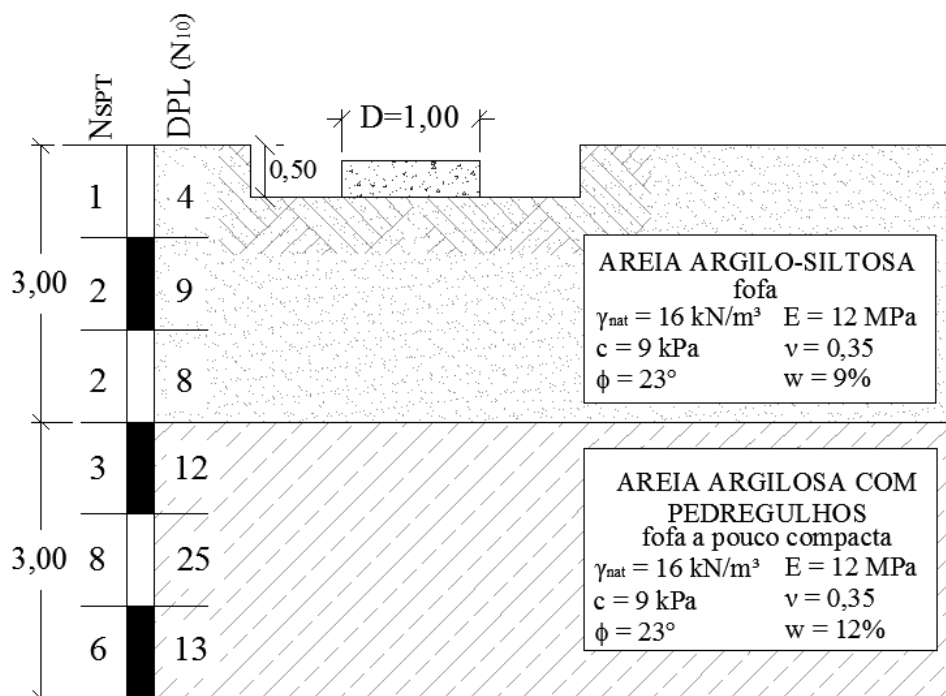


Figura 1. Perfil geotécnico do campo experimental obtido por ensaios de campo e laboratório.

4 SAPATAS ISOLADAS

Para a análise foi executada uma sapata isolada com 1 m de diâmetro e 0,20 m de altura, sendo estas as mesmas características da sapata isolada ensaiada por Oliveira (2022), ambas dispostas no mesmo campo experimental.

Por se tratar de uma análise do comportamento de fundações em solo colapsível em estado inundado, este estudo priorizou executar a prova de carga na sapata isolada com o solo diretamente inundado, sem que houvesse a etapa de pré-carregamento com a umidade do solo em estado natural. Tal procedimento foi adotado porque visou-se analisar como se daria o comportamento do solo em seu estado inicial de tensões sem um histórico de carregamentos precedentes ao ensaio inundado, permitindo assim, obter dados para uma análise comparativa com a fundação direta do tipo sapata isolada ensaiada por Oliveira (2022) com o solo em seu estado natural e com inundado após um pré-carregamento.

Com isso, para a prova de carga da sapata isolada com o solo diretamente em estado inundado procedeu-se com uma inundaç o pr via por um per odo de 24 horas antecedentes ao ensaio (Figura 2-a), cessando o fluxo de  gua ao iniciar a prova de carga (Figura 2-b). Visando eliminar a influ ncia de contato da lateral da sapata com o solo, realizou-se anteriormente ao in cio da inunda o uma escava o do solo ao redor da mesma. Esta escava o tamb m serviu para evitar mudan as no teor de umidade, ou suc o, do solo subjacente  s laterais da sapata. Al m disso, facilitou no processo de inunda o garantindo que fosse poss vel manter uma lâmina d' gua constante ao redor da sapata durante  s 24 horas que antecederam ao ensaio.

As provas de carga abordadas nesse artigo e por Oliveira (2022), foram realizadas de acordo com a norma ABNT NBR 6489:2019. No ensaio realizado por Oliveira (2022), a etapa de pr -carregamento teve dura o de 4 horas e 50 minutos, seguida por um processo de inunda o de 24 horas, e posteriormente, pela realiza o do recarregamento, que durou 5 horas e 05 minutos. No ensaio da sapata com o solo previamente inundado por 24 horas e sem pr -carregamento, a dura o do ensaio foi de 8 horas.

- a) Pré-inundação de solo para prova de carga em sapata isolada b) Fluxo de água cessado imediatamente antes do início do ensaio



Figura 2. Prova de carga em sapata isolada com solo em estado inundado.

Os intervalos de tempo de medição durante o ensaio foram os mesmos para ambas as sapatas, e padronizados de acordo com a ABNT NBR 6489:2019, sendo estes executados em estágios iguais e sucessivos, observando-se que a carga aplicada em cada estágio fixado em 20% da carga de trabalho prevista para a fundação teste, da qual foram mantidos até a estabilização dos deslocamentos e por no mínimo por 30 minutos. Devido a escasses de resultados anteriores de prova de carga realizados no local e por se tratar de solo colapsível, foram definidos carregamentos de 5 em 5 kN em cada estágio e procedeu-se o ensaio de carregamento até atingir um recalque máximo de 62 mm, sendo este um deslocamento suficiente para caracterizar a ruptura da sapata isolada. Tanto para os ensaios de Oliveira (2022) como para o deste trabalho, foram adotados como critério que o valor de recalque mínimo de 25 mm fosse alcançado conforme relatos feitos por Teixeira e Godoy (2016) ou que, nas situações em que não fosse possível verificar a chamada ruptura nítida, fossem obtidos estágios de carregamento suficientes para determinar a carga de ruptura da sapata por meio da curva carga-recalque, critérios estes amplamente conhecidos e aplicados no meio técnico para determinar a carga de ruptura em fundação rasa. Posteriormente a isto, conforme a ABNT NBR 6489:2019 procedeu-se o descarregamento da fundação em quatro estágios, tendo estes respectivamente 75, 50, 25% e 0% da carga máxima de ensaio até o descarregamento total.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos por meio da prova de carga realizada no campo experimental com o solo sob o estado inundado são apresentados comparando-os aos resultados obtidos por Oliveira (2022) em suas provas de carga com o solo em estado natural, seguido do ensaio pré-carregado inundado.

Por meio da Figura 3, é possível avaliar a curva tensão vs deslocamento (azul) obtida por meio de prova de carga estática para a sapata isolada com o solo em estado inundado sem pré-carregamento. Neste ensaio foi aplicada uma carga máxima de 50 kN, correspondente a uma tensão de 64 kPa, que ocasionou um deslocamento máximo de 62,15 mm. De acordo com a proposição adotada que foi mencionada anteriormente, em termos admissíveis, foi obtida uma tensão de ruptura convencional para um recalque de 25 mm de aproximadamente 33 kPa, resultando em uma carga admissível de 17 kPa ($FS = 2$) com um recalque admissível de 6,46 mm.

Ainda na Figura 3, é possível compararmos a sapata isolada ensaiada em estado inundado com a sapata isolada ensaiada por Oliveira (2022) com as mesmas características construtivas e geotécnicas. Neste ensaio o autor realizou inicialmente uma prova de carga com o solo em estado natural de umidade e procedeu o descarregamento. Ao término do ensaio natural, se iniciou a inundação por 24 horas, cessou o fluxo de água e recarregou a mesma passado esse tempo de inundação, obtendo as curvas indicadas em cinza na imagem.

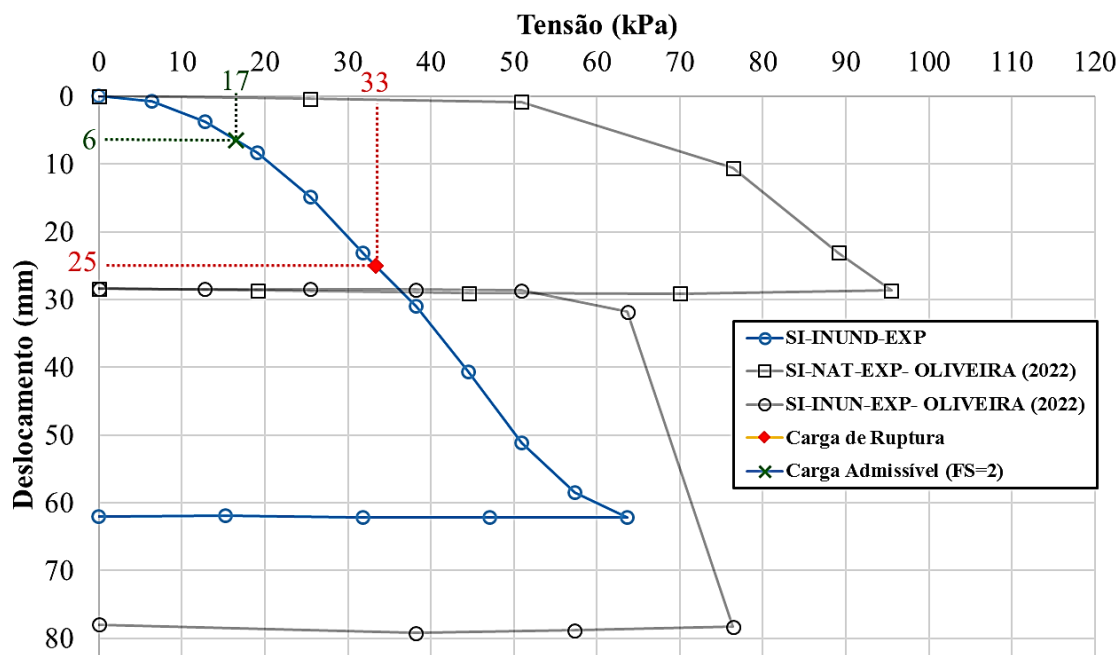


Figura 3. Curva tensão versus deslocamento obtida por ensaio experimental de sapata isolada em estado natural e inundado, com e sem pré-carregamento.

Para fins de comparação, além dos valores obtidos na prova de carga inundada sem pré-carregamento (SI-INUND-SPC-EXP) desta pesquisa, a Tabela 2 mostra também os valores obtidos por Oliveira (2022) para as mesmas fundações com o solo em estado natural (SI-NAT-EXP) e com o solo inundado após o pré-carregamento (SI-INUND-PC-EXP). Nota-se pela relação percentual entre a tensão de ruptura em estado inundado e natural que houve uma queda significativa da tensão de ruptura das fundações quando ensaiadas no estado inundado, sendo de 24 % para a situação com inundações após um pré-carregamento e 64 % para a inundada desde o início do primeiro carregamento.

Tabela 2. Comparativo de tensões de ruptura e admissíveis e recalque admissível em estado natural e inundado com e sem pré-carregamento

Fundação	$\sigma_{rup}^{(1)}$ (kPa)	$\sigma_{adm}^{(2)}$ (kPa)	$s_{adm}^{(3)}$ (mm)	$\frac{\sigma_{inund}}{\sigma_{nat}}$ (%)	$\Delta\sigma^{(4)}$ (%)	Autor do ensaio
SI-NAT-EXP	92	46	3,45	-	-	Oliveira (2022)
SI-INUND-PC-EXP	70	35	0,13	76	24	Oliveira (2022)
SI-INUND-SPC-EXP	33	17	6,46	36	64	Autores (2023)

- (1) Tensão convencional de ruptura para um deslocamento igual a 25 mm ou com ruptura nítida.
- (2) Tensão admissível para um fator de segurança igual a 2.
- (3) Recalque admissível correspondente a tensão admissível.
- (4) Percentual de redução da tensão de ruptura das fundações quando ensaiadas no estado inundado com e sem pré-carregamento.

Além disso, se for desconsiderado o recalque acumulado advindo do pré-carregamento na curva tensão vs deslocamento obtida por Oliveira (2022) e compara-la com a curva obtida no ensaio deste trabalho (Figura 3), verifica-se que a sapata quando ensaiada com inundações prévias sem um pré-carregamento apresenta uma tensão de ruptura inferior em comparação com a mesma sapata ensaiada inundada após um pré-carregamento sendo essa queda entre elas da ordem de 53% para um mesmo deslocamento de 25mm observado em ambas, cuja tensão é de 33 kPa contra 70 kPa, respectivamente. Nota-se também na curva com inundações prévias sem pré-carregamento que para uma mesma carga os deslocamentos observados são significativamente superiores

comparados aos da curva inundada com o pré-carregamento, o que indica uma maior porosidade do solo com índice de vazios mais elevado.

CONCLUSÕES

Neste artigo, foram analisadas fundações assentes em solos colapsíveis em estado natural e inundado, com e sem pré-carregamento. Para tanto, foi realizada uma prova de carga em uma sapata isolada, com 0,20 m de altura e 1 m de diâmetro, assente em solo colapsível de Uberlândia (MG), inundada desde o início e sem pré-carregamento. Os resultados foram comparados aos resultados obtidos por Oliveira (2022) que ensaiou uma sapata idêntica a deste artigo, mas que foi inicialmente pré-carregada e descarregada em estado natural, seguida pelo processo de inundação do solo ao redor da sapata, e posteriormente recarregada até a ruptura.

Os resultados indicaram uma redução significativa na tensão de ruptura das sapatas quando submetidas a ensaios em estado inundado em comparação com as sapatas testadas em seu estado natural, sendo esta diminuição de 24% quando a inundação ocorreu após um pré-carregamento e de 64% quando a sapata já estava inundada desde o início do ensaio de prova de carga. Ao analisar as curvas carga versus recalque, observou-se também que a sapata submetida a inundação prévia e sem pré-carregamento, apresentou uma tensão de ruptura inferior em relação àquela ensaiada após um pré-carregamento, com uma queda de aproximadamente 53%.

A aplicação de pré-carregamento em sapata assente em solo colapsível sob condição de umidade natural, assegurou recalques menores durante o carregamento na condição inundada, demonstrando que o processo de compressibilidade do solo subjacente a sapata, diminui os efeitos de colapsibilidade do solo e suas implicações para às fundações e, conseqüentemente, a estrutura da construção.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG APQ-00335-21) e à Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira De Normas Técnicas (2019). *NBR 6489 - Solo: Prova De Carga Estática Em Fundação Direta*. Rio De Janeiro.

Albuquerque, P. J. R., Garcia, J. R. (2020) *Engenharia De Fundações*. 1ª Ed, 361 P. Rio De Janeiro.

Associação Brasileira De Normas Técnicas (2019). *NBR 6122 - Projeto E Execução De Fundações*. Rio De Janeiro.

Cintra, J. C. A., Aoki, N. (2009). *Projeto De Fundações Em Solos Colapsíveis*. São Carlos.

CODEMIG/IGC-CPMTC-UFMG (2017). *Projeto Triângulo Mineiro*. Folha Uberlândia Se.22-Z-B-Vi Escala 1:100.000. Belo Horizonte.

Costa, Y.D. J. (1999). *Estudo do Comportamento de Solo Não Saturado através de Provas de Carga em Placa*. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, São Carlos.

Oliveira, E. A. S. (2022). *Análise Experimental e Numérica do Comportamento de Sapata Estaqueada em Solo Tropical*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Teixeira, A. H., Godoy, N. S. (2016). *Análise, projeto e execução de fundações rasas*. In: Hachich, W., Falconi, F. F. et al. *Fundações: Teoria E Prática*. 2. Ed. São Paulo: Pini Ltda, 2016. p. 802.

Vianna, A. P. F., Cintra, J. C. A., Aoki, N. (2007). *Influence of footing size and matric suction on the behavior of shallow foundations in collapsible soil*. *Soils and rocks*, V. 30, N. 3, p. 127–137.