

# Estudo da Suscetibilidade ao Efeito Tschebotarioff em Estacas por Meio de Lógica Difusa

Fábio Lima Sales

Graduado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Crateús, [fabiolima77@alu.ufc.br](mailto:fabiolima77@alu.ufc.br)

Marcio Avelino de Medeiros

Professor, Universidade Federal do Ceará, Crateús, [marcio.medeiros@crateus.ufc.br](mailto:marcio.medeiros@crateus.ufc.br)

Renan Barbosa Neves

Doutorando em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, [renanneves@usp.br](mailto:renanneves@usp.br)

**RESUMO:** Ao se trabalhar com solos moles, na maioria das vezes é indicada a utilização de estacas para as fundações da superestrutura, no entanto essas estacas podem sofrer sérios problemas estruturais, devido a fenômenos como o efeito Tschebotarioff que ocorre devido cargas assimétricas na superfície do terreno, com a presença de solos moles, que podem gerar esforços horizontais nas estacas. O presente estudo calibrou um modelo inteligente, por meio da lógica difusa, para estimar a suscetibilidade de ocorrência do efeito Tschebotarioff em estacas executadas em solos moles. A metodologia de trabalho consiste na determinação dos parâmetros mais influentes para a ocorrência do efeito Tschebotarioff, transformar esses parâmetros em variáveis linguísticas de entrada e saída, elaborar regras fuzzy que consistem na combinação entre as variáveis de entrada resultando em uma resposta de saída e calibrar o modelo inteligente utilizando essas informações. A partir da análise dos resultados obtidos pelo modelo inteligente tem-se que as variáveis que mais levam a ocorrência do fenômeno em estudo são o carregamento na superfície do solo e a distância que as estacas se encontram do carregamento, onde para estacas próximas ao carregamento se encontram os maiores esforços de flexão. Por fim, com a realização deste trabalho foi possível desenvolver uma ferramenta que pode auxiliar o engenheiro na tomada de decisões.

**PALAVRAS-CHAVE:** Efeito Tschebotarioff, Lógica Difusa, Solos Moles.

**ABSTRACT:** When working with soft soils, most of the time it is recommended to use piles for the foundations of the superstructure, however these piles can suffer serious structural problems, due to phenomena such as the Tschebotarioff effect, which occurs due to asymmetrical loads on the ground surface, with the presence of soft soils, which can generate horizontal stress on the piles. This work aims to calibrate an intelligent model, using fuzzy logic, to estimate the susceptibility to the occurrence of the Tschebotarioff effect in piles driven in soft soils. The work methodology consists of determining the most influential parameters for the occurrence of the Tschebotarioff effect, transforming these parameters into input and output linguistic variables, developing fuzzy rules that consist of the combination between the input variables resulting in an output response and calibrating the intelligent model using this information. From the analysis of the results obtained by the intelligent model, it is clear that the variables that most lead to the occurrence of the phenomenon under study are the load on the soil surface and the distance that the piles are from the load, where for piles close to the load, encounter the greatest bending efforts. Finally, by carrying out this work it was possible to develop a tool that can assist the engineer in making decisions, as it can provide information regarding the bending efforts in the pile.

**KEYWORDS:** Tschebotarioff Effect, Fuzzy Logic, Soft Soils.

## 1 INTRODUÇÃO

Em solos adensáveis, com estacas executadas, quando a superfície é solicitada por cargas unilaterais, pode ocorrer o fenômeno do efeito Tschebotarioff. De acordo com Cintra e Aoki (2011) o efeito Tschebotarioff

ocorre quando, durante o processo de adensamento da camada de argila mole, solicitada por uma carga vertical assimétrica, surgem esforços horizontais nas estacas que podem causar deslocamentos e levá-las a ruptura. Na prática as estacas servem como um impedimento ao deslocamento das massas de solo que sofreram deformação devido ao carregamento assimétrico e ficam sujeitas a um carregamento transversal em profundidade.

Heyman e Boersma (1961) e Wenz (1963) propuseram medidas para estudar e avaliar os impactos do efeito Tschebotarioff. Esse trabalho busca utilizar uma nova abordagem para mensurar esse problema, utilizando a lógica difusa (fuzzy logic), uma vez que ao realizar pesquisas em bibliografias, artigos e dissertações não foram encontradas aplicações da lógica difusa para esse fim.

A lógica difusa é uma forma de interpretar dados que apresenta resultados além do verdadeiro ou falso, ela determina um grau de aproximação para uma dada solução. Segundo Hortegal (2016) a utilização da lógica Fuzzy permite a criação de um sistema especialista capaz de tomar decisões, evitando que a subjetividade das variáveis envolvidas no processo executivo possa levar a conclusões incertas. Assim, a lógica difusa vem a ser muito útil para analisar os parâmetros que contribuem para a ocorrência do fenômeno supracitado, possibilitando compreender as causas e efeitos do mesmo.

### 1.1 Efeito Tschebotarioff

O efeito Tschebotarioff é um fenômeno geotécnico que ocorre quando um carregamento na superfície do terreno passa a gerar deslocamentos horizontais no solo que por consequência passa a gerar esforços horizontais em estacas embutidas no solo próximas a sua área de influência. A primeira pessoa a estudar a fundo tal fenômeno foi o engenheiro russo Tschebotarioff, em 1962, por isso o fenômeno leva seu nome, suas contribuições foram essenciais para o entendimento do assunto.

De acordo com Velloso e Lopes (2011), os fatores que mais influenciam na solicitação lateral de estacas são:

- Valor da sobrecarga;
- Características da camada compressível;
- Fator de segurança à ruptura global;
- Distância das estacas à sobrecarga;
- Rigidez das estacas;
- Geometria do estaqueamento;
- Fator tempo.

No ano de 2001, na cidade litorânea de Ubatuba, localizada no estado de São Paulo, ocorreu um caso de ruptura de estacas em um condomínio de 5 pavimentos. O condomínio Anêmona havia sido entregue há pouco tempo quando um de seus blocos colapsou. Após investigações, constatou-se que, devido a execução de um aterro nas proximidades do condomínio, para fins de urbanização, o acréscimo de tensão vertical na superfície do terreno provocou o seu deslocamento. Como resultado, as estacas do condomínio próximas ao aterro ficaram sujeitas a tensões horizontais ao longo de seu fuste (Sousa, 2003).

### 1.2 Lógica difusa

A constante busca pela otimização de serviços, resultou em muitas tecnologias para solucionar problemas em grandes velocidades e revolucionar a maneira de realizar tarefas. Neste contexto, surge a lógica difusa (do inglês, fuzzy logic) publicada pela primeira vez pelo matemático Lotfi A. Zadeh, em 1965, com o objetivo de efetuar a resolução de problemas no tratamento de informações de caráter impreciso ou raso.

A ideia da lógica difusa é trabalhar com a incerteza das informações, diferentemente da lógica booleana, a lógica difusa apresenta resultados não limitados a certezas absolutas, ela permite trabalhar com o abstrato e gerar um grau de aproximação para uma dada solução. Para tal, essa ferramenta matemática trabalha com o conceito de pertinência onde o intervalo de pertinência de uma dada informação está situado entre 0 e 1, ([0, 1]), onde o 0 significa que um elemento não pertence a determinado conjunto e o 1 significa total pertinência ao conjunto, já os valores entre 0 e 1 representam os graus parciais de pertinência. Assim na lógica fuzzy, um elemento que pertence a um conjunto com determinado grau de pertinência pode gerar uma sentença parcialmente verdadeira e parcialmente falsa, (MARRO, et al., 2010).

De acordo com Hortegal (2016), a definição das variáveis linguísticas diferentemente da lógica tradicional é de extrema relevância para a lógica difusa, pois possibilita captar o grau de incerteza presente nessas variáveis e traduzir para um modelo matemático. Ao realizar essa tradução a lógica fuzzy converte as variáveis em números que as quantifica, esses números são chamados de valores de pertinência e a forma como são determinados depende da função de pertinência adotada.

### 1.3 Aplicações da lógica difusa na engenharia geotécnica

Segundo Cheng, M.Y., et al. (2008), na maioria das vezes os problemas de engenharia geotécnica são marcados por apresentar informações indefinidas, ambíguas e incompletas. Em virtude disso, geralmente esses problemas são resolvidos por meio do conhecimento e experiência de especialistas no assunto. Dessa forma, as inteligências artificiais (IA's) surgem como uma ferramenta que funciona inspirada na capacidade do cérebro humano de tomar decisões (Chandwani et al., 2014). Essas tecnologias podem ser utilizadas para analisar e buscar soluções para os mais diversos problemas, incluindo problemas geotécnicos.

Na literatura encontram-se trabalhos que utilizam a lógica difusa para análise e controle de processos relacionados à engenharia geotécnica. Slashchov (2019) relata a existência de trabalhos do Instituto de Mecânica Geotécnica da Academia Nacional de Ciências da Ucrânia que utilizam algoritmos baseados em lógica difusa para aprimorar os sistemas de segurança na mineração. Nessa ocasião os algoritmos da lógica difusa foram empregados para realizar a análise dos dados de entrada para monitorar o estado de tensão-deformação das rochas, o sistema mostrou-se eficiente sendo capaz de emitir sinais de perigo em situações de problemas de instabilidade das minas.

Huang e Siller (1997) utilizaram a lógica difusa para fazer a caracterização geotécnica de solos, por meio de conjuntos fuzzy que analisavam dados coletados do local e deduziam o perfil dos subsolos. O sistema fuzzy resultante findou em uma nova maneira de desenvolver perfis subsuperficiais e caracterizar locais (Onyelowe, Kennedy C., et al., 2023). Também utilizando a lógica difusa para caracterização geotécnica de solos, Djemalddine et al. (2011) conclui que a lógica difusa pode ser utilizada por engenheiros geotécnicos como uma ferramenta de suporte na tomada de decisões sistemáticas para problemas de caracterização locais. Mohamed, Tarig et al. (2012) usou um sistema baseado em lógica difusa para analisar a estabilidade de um talude. Com base em alguns dos parâmetros do talude foram definidas variáveis de entrada e uma variável de saída.

Hortegal (2016) usou um modelo em lógica difusa para o controle de desempenho de estacas hélice contínua visando aprimorar a execução desse tipo de fundação. Para isso a autora utilizou como variável de entrada parâmetros como velocidade de perfuração, torque de execução, resistência do solo, variação de pressão média do operador e superconsumo de concreto e como variáveis de saída a energia de instalação e a capacidade de carga admissível da estaca.

## 2 METODOLOGIA

O fluxograma apresentado na Figura 1 mostra as etapas da metodologia deste trabalho.

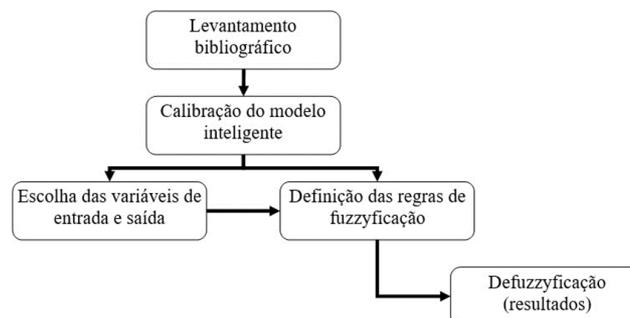


Figura 1. Fluxograma das etapas da metodologia

## 2.1 Escolha das variáveis de entrada e saída

Nesta etapa da pesquisa foram determinadas as principais variáveis que levam a ocorrência do efeito Tschebotarioff em estacas. Essas variáveis são função das propriedades do solo, do elemento de fundação e do processo de execução das estacas. A definição dessas variáveis é essencial para a aplicação no sistema fuzzy. Desse modo, as variáveis foram divididas em dois grupos, que correspondem às variáveis linguísticas de entrada e saída do sistema fuzzy. A Tabela 1 apresenta as variáveis de entrada e saída determinadas para o fenômeno estudado.

Tabela 1.

Variáveis – Efeito Tschebotarioff	
Entrada	Saída
Carregamento (aterro)	Esforços de flexão
Módulo de deformabilidade do solo	
Rigidez da estaca	
Distância do carregamento	

Após definir as variáveis, foi preciso definir os intervalos de valores que as mesmas podem assumir. Para tal, recorreu-se a literatura e buscou-se um estudo de caso envolvendo o efeito Tschebotarioff. O trabalho de Marcelino (2022), fez uma comparação entre alguns métodos de estimar o efeito Tschebotarioff, utilizando como estudo de caso o perfil longitudinal de um aterro em Amsterdã. Desse trabalho foram obtidos os valores máximos para cada variável, como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2.

Variáveis (E. Tschebotarioff)	Valores	
	Mínimos	Máximos
Carregamento (aterro)	0	18 kN/m <sup>3</sup>
Mód. de deformabilidade do solo	0	30 MPa
Rigidez da estaca	0	200 GPa
Distância do carregamento	0	30 m
Esforços de flexão	0	160 kN.m

## 2.2 Definição das regras de fuzzyficação

As regras de fuzzyficação foram determinadas com base nos parâmetros escolhidos para analisar o efeito Tschebotarioff, que são resultado de várias pesquisas que já foram realizadas a fim de estudar esse fenômeno.

No total foram elaboradas 240 regras, que são resultado das diferentes combinações realizadas entre as variáveis logísticas de entrada, que resultaram em uma resposta (variável logística de saída). Todas as regras de fuzzyficação utilizadas para elaborar o sistema fuzzy encontram-se no Anexo 1, entretanto uma pequena amostra pode ser observada na Figura 2.

Regra	Entrada				Saída
	Carregamento	Mód. De deformabilidade do solo	Rigidez da estaca	Distância do carregamento	Esforços de flexão
1	Muito baixo	Baixo	Muito baixa	Muito perto	Baixo
2	Muito baixo	Baixo	Muito baixa	Perto	Baixo
3	Muito baixo	Baixo	Muito baixa	Mediana	Baixo
4	Muito baixo	Baixo	Muito baixa	Longe	Baixo
5	Muito baixo	Baixo	Muito baixa	Muito Longe	Baixo
6	Muito baixo	Baixo	Baixa	Muito perto	Baixo
7	Muito baixo	Baixo	Baixa	Perto	Baixo
8	Muito baixo	Baixo	Baixa	Mediana	Baixo
9	Muito baixo	Baixo	Baixa	Longe	Baixo
10	Muito baixo	Baixo	Baixa	Muito longe	Baixo

Figura 2. Exemplificação das regras adotadas.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na figura 3 apresentam no eixo x, a distância do carregamento (distância da estaca até o aterro), no eixo y, o carregamento (representado pelo aterro), e no eixo z, os esforços de flexão a qual a estaca está sujeita. Nota-se que quanto maior o carregamento associado à uma menor distância das estacas ao carregamento, maior é o esforço de flexão na estaca. Tal comportamento é semelhante ao encontrado por Marcelino (2022), que ao utilizar um modelo numérico para cálculo do efeito Tschebotarioff, verificou que nas estacas mais distantes ao pé do aterro houve um menor esforço de flexão, e nas mais próximas ao pé do aterro houveram os maiores esforços de flexão.

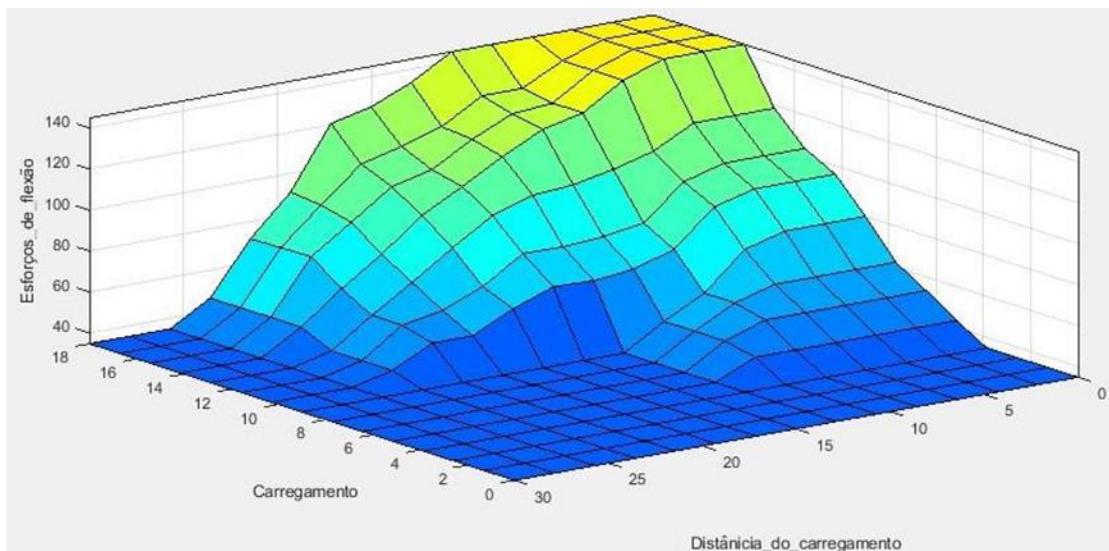


Figura 3. Variação Distância do carregamento à estaca x Carregamento (aterro) x Esforços de flexão na estaca.

Os resultados encontrados por Heyman e Boersma (1961), ao estudar o efeito de execução de aterro na proximidade de estacas, também condizem com os resultados encontrados para os esforços de flexão neste trabalho. Como conclusão foi recomendado pelos autores a utilização de estacas com armação reforçada em todos os casos de fundações por estacas com uma distância inferior a 25 metros de um futuro aterro.

Na figura 4 apresentam-se no eixo x, a rigidez da estaca, no eixo y, o carregamento (representado pelo aterro), e no eixo z, os esforços de flexão na estaca. Observa-se que não ocorre uma relação direta entre o carregamento e a rigidez da estaca, uma vez que o fator mais influente para o aumento dos esforços de flexão na estaca é o carregamento produzido nas camadas de solo pelo aterro.

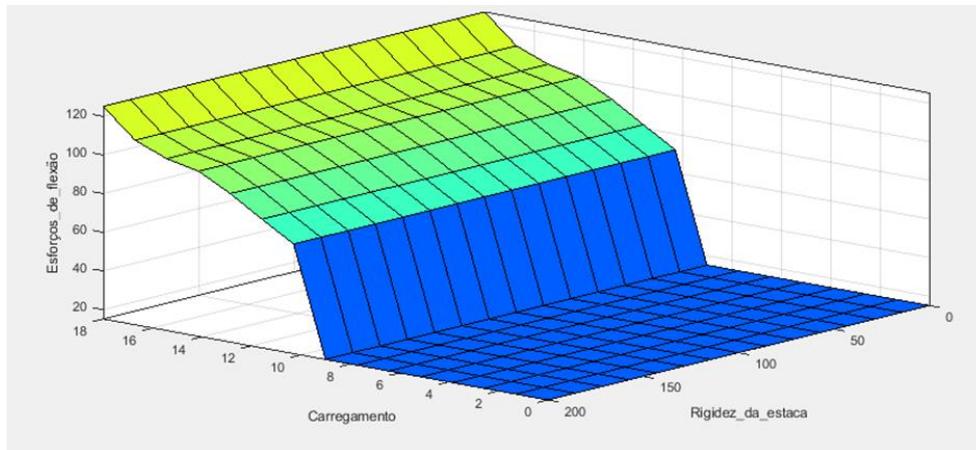


Figura 4. Variação Rigidez da estaca x Carregamento (aterro) x Esforços de flexão na estaca.

Na figura 5 apresentam-se no eixo x, o módulo de deformabilidade do solo, no eixo y, o carregamento (representado pelo aterro), e no eixo z, os esforços de flexão na estaca. Nota-se que nessa situação o módulo de deformabilidade do solo não apresentou relação direta com o carregamento, visto que o esforço de flexão na estaca tende a aumentar devido apenas ao aumento da parcela de carregamento.

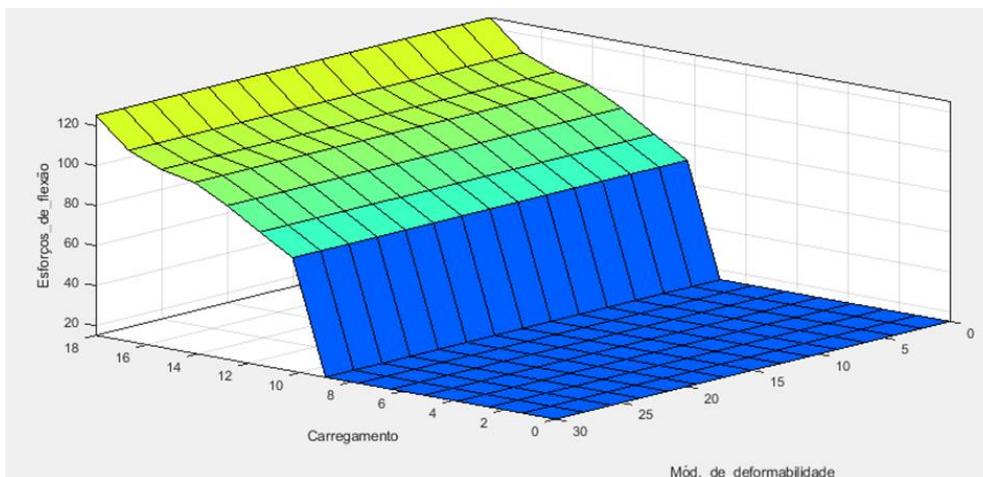


Figura 5. Variação Módulo de deformabilidade do solo x Carregamento (aterro) x Esforços de flexão na estaca.

Ao comparar os resultados mostrados nas figuras 4 e 5, observa-se que quando relacionadas com a variável carregamento as variáveis rigidez da estaca e módulo de deformabilidade tendem a gerar esforços mais expressivos para carregamentos superiores a  $8 \text{ kN/m}^3$ . Assim, mesmo considerando padrões de rigidez e deformabilidade adequados, estacas executadas em solos moles estão suscetíveis a esforços de flexão consideráveis, a depender do carregamento.

O modelo inteligente elaborado é uma ferramenta capaz de auxiliar o engenheiro na tomada de decisões ao executar estacas em solos suscetíveis ao efeito Tschebotarioff. Ao fazer uso desse sistema o engenheiro pode ter uma maior noção dos esforços de flexão ao qual a estaca estará submetida e poderá fazer o dimensionamento adequado para a estaca resistir a esses esforços. Todavia, é indispensável que o conjunto de regras fuzzy seja preciso, quanto mais preciso for melhor será o desempenho do sistema inteligente.

A calibração do modelo inteligente se mostrou eficaz uma vez que não são necessários altos custos computacionais, nem grandes tempos de processamento, que varia de acordo com a quantidade de variáveis definidas e suas regras fuzzy. Com as regras fuzzy, e as variáveis já definidas, o processo de calibração pode ser feito sem muitos desafios. Logo, do ponto de vista técnico, a utilização dessa ferramenta se torna viável e pode oferecer um bom suporte na tomada de decisões por parte do profissional.

## 5 CONCLUSÕES

A respeito dos fatores que mais influenciam na ocorrência do efeito Tschebotarioff em estacas, foram destacados o carregamento (aterro), a rigidez da estaca, a compressibilidade do solo e a distância que as estacas se encontram do carregamento (pé do aterro). Pela metodologia utilizada, o sistema inteligente apontou que os parâmetros mais influentes para a suscetibilidade ao efeito Tschebotarioff são o carregamento produzido pelo aterro nas camadas de solo e a distância que as estacas são executadas em relação ao pé do aterro.

Quanto à calibração do modelo inteligente, utilizando a lógica difusa, constatou-se que a ferramenta pode auxiliar muito os especialistas na tomada de decisões, uma vez que as incertezas podem ser melhor analisadas utilizando a metodologia fuzzy que gera uma resposta mais precisa. Neste trabalho o sistema foi modelado utilizando a Fuzzy Logic ToolBox presente no software MATLAB®, o software se mostrou adequado para trabalhar com a lógica difusa não apresentando muitos problemas, não exige um alto custo computacional nem longos tempos de processamento, que vão variar de acordo com a quantidade de regras fuzzy utilizadas e também a quantidade de variáveis adotadas. Assim, esse sistema inteligente pode ser aplicado em diversas áreas de estudo, facilitando e acelerando processos, bem como gerando resultados mais precisos diante de problemas no tratamento de informações de caráter impreciso ou raso.

Em relação à suscetibilidade ao efeito Tschebotarioff, o sistema inteligente apontou que estacas demasiado próximas a cargas verticais assimétricas no solo, provocadas seja por aterros, por silos ou reservatórios, ficam mais sujeitas a grandes esforços de flexão que podem levá-las a ruptura. Já estacas mais distantes do carregamento assimétrico, sofrem esforços menos intensos, e têm menos propensão a sofrerem com patologias, como fissuras, rachaduras ou mesmo a ruptura total.

Por fim, com relação aos esforços de flexão obtidos, notou-se uma notória semelhança com as literaturas comparadas, não se pode ter uma melhor ideia devido à falta de trabalhos com a mesma temática. É possível que a implantação de mais variáveis, e consequentemente mais regras fuzzy, no modelo inteligente proporcione resultados ainda mais relevantes. Ademais, conclui-se que o modelo inteligente adotado pode refletir o comportamento real obtido em campo e auxiliar o engenheiro na tomada de decisões, uma vez que ele pode ser utilizado para determinar os esforços de flexão que as estacas estarão sujeitas previamente a execução, facilitando assim o dimensionamento correto destas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6484: Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT – Método de Ensaio, Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- AOKI, N. Esforços horizontais em estacas de pontes provenientes da ação de aterros de acesso. In: CBMSEF, 4., 1970, Rio de Janeiro. Anais, Rio de Janeiro, 1970. v. 1, tomo I.
- CHANDWANI, V., Agrawal, V., & Nagar, R. (2014). Applications of artificial neural networks in modeling compressive strength of concrete: a state of the art review. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 4(4), 2949-2956.
- CHENG, M. Y., TSAI, H. C., KO, C. H., & CHANG, W. T. (2008). Evolutionary fuzzy neural inference system for decision making in geotechnical engineering. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 22(4), 272-280.
- CINTRA, José Carlos A.; AOKI, Nelson. Fundações por estacas: projeto geotécnico. Oficina de Textos, 2011.
- HEYMAN, L.; BOERSMA, L. Bending moments in piles due to lateral earth pressure. In: Proc., 5th ICSMFE. 1961. p. 425-429.
- HORTEGAL, Mylane Viana. Aplicação da lógica fuzzy no controle do desempenho de estacas hélice contínua. 2016.
- HUANG, Y.-T.; SILLER, T. J. Fuzzy representation and reasoning in geotechnical site characterization. *Computers and Geotechnics*, v. 21, n. 1, p. 65-86, 1997.

- MARCELINO, Luiz Eduardo Monteiro. Efeito de Tschebotarioff em estacas: comparação entre dados de instrumentação e resultados de modelagem numérica e de métodos semiempíricos. 2022. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- MARRO, A. A., SOUZA, A. D. C., CAVALCANTE, E. D. S., BEZERRA, G. S., & NUNES, R. O. (2010). Lógica fuzzy: conceitos e aplicações. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), 2.
- MOHAMED, Tarig, Anuar kasa, and Mohd Raihan Taha. Fuzzy logic system for slope stability prediction. *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inform Technol*, v. 2, n. 2, p. 38, 2012.
- SLASHCHOV, Anton; YALANSKYI, Oleksii. Substantiation of fuzzy logic algorithms for control problems of a geotechnical systems. In: *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences, 2019. p. 00091.
- VELLOSO, Dirceu de Alencar; LOPES, Francisco de Rezende. *Fundações: Volume 2– Fundações Profundas*. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2010.
- WENZ, K. P. Über die Grobe des Seiten-druckes auf Pfahle in bindigen Erdstoffen, Veröffentlichungen des Inst. Bodenmech. Grundbau der Techn. Hochs.Frid. in Karlsruhe, Heft 12, 1963.
- ZADEH, Lotfi A. Fuzzy sets. *Information and control*, v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965.