



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

FABIO LIMA SALES

ESTUDO DA SUSCETIBILIDADE AO EFEITO TSCHEBOTARIOFF EM ESTACAS
POR MEIO DE LÓGICA DIFUSA

CRATEÚS

2023

FABIO LIMA SALES

ESTUDO DA SUSCETIBILIDADE AO EFEITO TSCHEBOTARIOFF EM ESTACAS POR
MEIO DE LÓGICA DIFUSA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Marcio Avelino de Medeiros.

CRATEÚS

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S155e Sales, Fabio Lima.
Estudo da suscetibilidade ao efeito Tschebotarioff em estacas por meio de lógica difusa / Fabio Lima Sales. – 2023.
46 f.: il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2023.
Orientação: Prof. Me. Marcio Avelino de Medeiros.
1. Efeito Tschebotarioff. 2. Lógica difusa. 3. Solo moles. I. Título.

CDD 620

FABIO LIMA SALES

ESTUDO DA SUSCETIBILIDADE AO EFEITO TSCHEBOTARIOFF EM ESTACAS POR
MEIO DE LÓGICA DIFUSA.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Civil.

Aprovada em: 06/12/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Marcio Avelino de Medeiros (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Thiago Fernandes da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Me. Renan Barbosa Neves
Universidade de São Paulo (USP)

A Deus.

A minha mãe, Lucelene, por todo o amor e apoio dado durante essa jornada

AGRADECIMENTOS

À minha família por todo o apoio durante a minha graduação, em especial a minha mãe por todo o amor e confiança.

Ao Prof. Me. Marcio Avelino por todo o empenho e dedicação, e por ter me orientado durante a realização deste trabalho.

Aos professores participantes da banca examinadora Me. Thiago Fernandes da Silva e Me. Renan Barbosa Neves pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos queridos amigos que fiz durante essa jornada acadêmica, obrigado por toda a paciência, união e companheirismo.

“Uma mente que se abre para uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original.”
(Albert Einstein).

RESUMO

A análise geotécnica é um dos fatores mais relevantes para a concepção de obras de engenharia, visto que conhecendo as propriedades do solo onde a obra se aloca é possível determinar as melhores soluções para sua realização. 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. Este trabalho tem por finalidade calibrar um modelo inteligente, por meio da lógica difusa, para estimar a suscetibilidade de ocorrência do efeito Tschebotarioff em estacas cravadas 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, visto que ela pode fornecer informações referentes aos esforços de flexão na estaca, ajudando assim no dimensionamento adequado dessas fundações evitando problemas como o efeito Tschebotarioff.

Palavras-chave: efeito Tschebotarioff; lógica difusa; solos moles.

ABSTRACT

Geotechnical analysis is one of the most relevant factors for the design of engineering works, since knowing the properties of the soil where the work is located makes it possible to determine the best solutions for its design. 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, thus helping in the adequate dimensioning of these foundations, avoiding problems such as the Tschebotarioff effect.

Keywords: Tschebotarioff effect; fuzzy logic; soft soils.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Perfil geotécnico sintético da orla praiana de Santos.....	16
Figura 2 – Estacas sendo submetidas a esforços horizontais: (a) armazém estaqueado; (d) muro de encontro de pontes.....	17
Figura 3 – Sistema de controle fuzzy.....	20
Figura 4 – Função de pertinência triangular.....	20
Figura 5 – Função de pertinência trapezoidal.....	21
Figura 6 – Fluxograma das etapas da metodologia.....	23
Figura 7 – Exemplificação das regras adotadas.....	25
Figura 8 – Interface inicial da função Fuzzy Logic Toolbox.....	27
Figura 9 – Campo inicial de edição das variáveis.....	28
Figura 10 – Campo de adição e edição das regras de fuzzyficação.....	29
Figura 11 – Interface inicial com as variáveis de entrada e saída e regras de fuzzyficação.....	29
Figura 12 – Condições para as variáveis: (a) Carregamento; (b) Módulo de deformabilidade; (c) Rigidez da estaca; (d) Distância do carregamento; (e) Esforços de flexão.....	30
Figura 13 – Variação Distância do carregamento à estaca x Carregamento (aterro) x Esforços de flexão na estaca.....	32
Figura 14 – Variação Rigidez da estaca x Carregamento (aterro) x Esforços de flexão na estaca.....	33
Figura 15 – Variação Módulo de deformabilidade do solo x Carregamento (aterro) x Esforços de flexão na estaca.....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estado de compacidade e consistência	05
Tabela 2 – Variáveis de entrada e saída.....	14
Tabela 3 – Valores mínimos e máximos das variáveis de entrada e saída.....	14
Tabela 4 – Intervalos das variáveis e termos linguísticos.....	16

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Contextualização	11
1.2	Justificativa	12
1.3	Objetivos.....	13
1.3.1	Objetivo Geral	13
1.3.2	Objetivos Específicos.....	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.2	Solos Moles.....	14
2.3	Efeito Tschebotarioff	16
2.4	Lógica Difusa	18
2.4.1	Funções de pertinência.....	20
2.4.2	Aplicações da lógica difusa na engenharia geotécnica	21
3	METODOLOGIA	23
3.1	Levantamento bibliográfico.....	23
3.2	Escolha das variáveis de entrada e saída.....	24
3.3	Definição das regras de fuzzyficação	25
3.5	Processamento dos dados (Defuzzyficação) e obtenção dos resultados.....	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32
4.1	Esforços de flexão nas estacas	32
5.	CONCLUSÃO	35
5.1	Conclusões.....	35
5.2	Sugestões de trabalhos futuros	36
	REFERÊNCIAS	37
	ANEXO 1 – DEFINIÇÃO DAS REGRAS DE FUZZIFICAÇÃO.....	39

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O estudo geotécnico desempenha uma função fundamental no processo de construção de obras de infraestrutura e superestrutura. Ele consiste na análise preliminar das condições do terreno onde a obra será realizada, permitindo uma compreensão apurada das características geotécnicas do local. Essa análise é essencial para garantir a segurança da obra, prevenindo problemas como deslizamentos de terra ou afundamentos de solo, além de viabilizar a construção, considerando as particularidades do terreno. Exemplos de obras que se beneficiam deste estudo incluem edifícios, pavimentação de estradas e estruturas especiais, como torres e pontes.

Em conhecimento das propriedades do terreno, é preciso fazer a escolha do tipo de fundação que receberá as cargas solicitantes da superestrutura e transmitirá para o maciço de solo. Em se tratando de solos moles ou compressíveis, objeto de estudo dessa pesquisa, as fundações profundas (estacas) são as mais adequadas para atender os requisitos de segurança, haja visto que elas conseguem vencer as camadas de solo mole (menos resistentes) e se assentam em camadas mais resistentes, por onde serão transmitidas as cargas das estruturas.

Solos moles são altamente compressíveis, altamente deformáveis e geralmente têm baixa resistência ao cisalhamento, sendo influenciados principalmente pela natureza das partículas, estrutura da camada, nível de consolidação, teor de umidade e conteúdo orgânico. Quando cravadas em solos moles, as estacas ficam sujeitas a alguns fenômenos que podem vir a causar sérios problemas, como o efeito Tschebotarioff.

Em solos adensáveis, com estacas cravadas, 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.

Também em solos adensáveis, pode ocorrer o chamado atrito negativo, fenômeno no qual o solo mole onde a estaca é cravada recalca mais que o elemento de fundação. Segundo Cintra e Aoki (2011), uma consequência direta do atrito negativo é o surgimento de

um acréscimo de solicitação vertical na estaca, de cima para baixo, gerado pela camada adensável, o que pode comprometer a estrutura da estaca.

Muitos estudiosos como 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.

1.2 Justificativa

A utilização de solos moles como base de fundações apresenta desafios significativos na área da geotecnia devido à baixa resistência à compressão e alta deformabilidade desses solos. Para garantir a estabilidade e o desempenho adequado das estruturas construídas sobre esses solos, fundações do tipo profundo, como estacas, são as mais recomendadas. No entanto, mesmo com o dimensionamento adequado das estacas, fenômenos como o efeito Tschebotarioff podem afetar negativamente o desempenho das fundações, resultando em patologias, como fissuras e até mesmo a ruptura das estacas.

Diante dessa problemática, é essencial adotar abordagens inovadoras para a análise e mitigação desse fenômeno. Nesse contexto, a lógica difusa surge como uma ferramenta promissora que permite lidar com a incerteza e imprecisão dos dados envolvidos na análise geotécnica. Ao aplicar a lógica difusa, é possível realizar uma análise crítica dos fatores que mais influenciam a ocorrência do efeito Tschebotarioff, além de propor soluções efetivas para prevenir ou minimizar seus efeitos adversos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Implementar um modelo inteligente utilizando a lógica difusa para estimar a ocorrência do fenômeno efeito Tschebotarioff em fundações por estacas cravadas em solos moles.

1.3.2 Objetivos Específicos

Este trabalho tem como objetivos específicos:

- a) Investigar as causas de ocorrência do efeito Tschebotarioff em estacas cravadas em solos moles.
- b) Calibrar um modelo em lógica difusa para avaliação da ocorrência do efeito Tschebotarioff.
- c) Obter os valores dos esforços no qual estacas cravadas em solos moles estão sujeitas.
- d) Avaliar os valores dos esforços obtidos por meio da lógica difusa e comparar com os valores disponíveis na literatura.
- e) Definir os parâmetros mais influentes na ocorrência do efeito Tschebotarioff.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

As fundações sejam elas diretas, como as sapatas, ou profundas, como as estacas, são elementos que necessitam de muita cautela e atenção para seu adequado dimensionamento e execução, uma vez que elas recebem as cargas da superestrutura (lajes, vigas e pilares) e direcionam para o solo. Dessa forma, é indispensável que haja um bom projeto de fundações para evitar acidentes e retrabalho, uma vez que as fundações correspondem de 3 a 6% do custo total da obra (MILITITSKY et al. (2015)). Nessa seção serão apresentados os principais aspectos relacionados ao efeito Tschebotarioff, em solos moles, bem como o conceito por trás da lógica Fuzzy e sua relação com a determinação de problemas geotécnicos.

2.2 Solos Moles

Quando se trabalha com solos é importante saber classificá-los, de modo a entender o seu tipo de comportamento em função de suas características. Essa classificação é dada pela natureza do solo em estudo e considera fatores como formação geológica, localização, capacidade de suporte, consistência, índice de plasticidade, sensibilidade, dentre outros parâmetros.

Uma classificação comum de solo é o solo mole que segundo Massad (2010) são os solos sedimentares com baixa resistência a penetração (valores de SPT não superiores a 4 golpes), em que a fração argila imprime as características de solo coesivo e compressível. São em geral argilas moles ou areias argilosas fofas, de deposição recente, ou seja, formadas durante o quaternário.

De acordo com Moreira e Mazzuco (2015), devido ao processo de formação dos solos moles, no caso das argilas marinhas, se dá em parte pelo seu transporte por meio de águas marinhas, é comum que sua composição seja rica em matéria orgânica, húmus e resquícios de vida marinha.

Esse tipo de solo apresenta uma baixa capacidade de suporte, representando um desafio a concepção de obras em sua superfície. Assim, são necessárias técnicas de investigação do subsolo, como sondagens SPT, CPTu e Vane test. A NBR 6484: 2020 estabelece a classificação de um solo com base em sua resistência à penetração, como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 – Estado de compactidade e consistência.

Tipo de Solo	Índice de Resistência à Penetração (N)	Classificação
Argilas e siltes argilosos	≤ 2	Muito mole
	3 a 5	Mole
	6 a 10	Média(o)
	11 a 19	Rija(o)
	20 a 30	Muito rija(o)
	> 30	Dura(o)

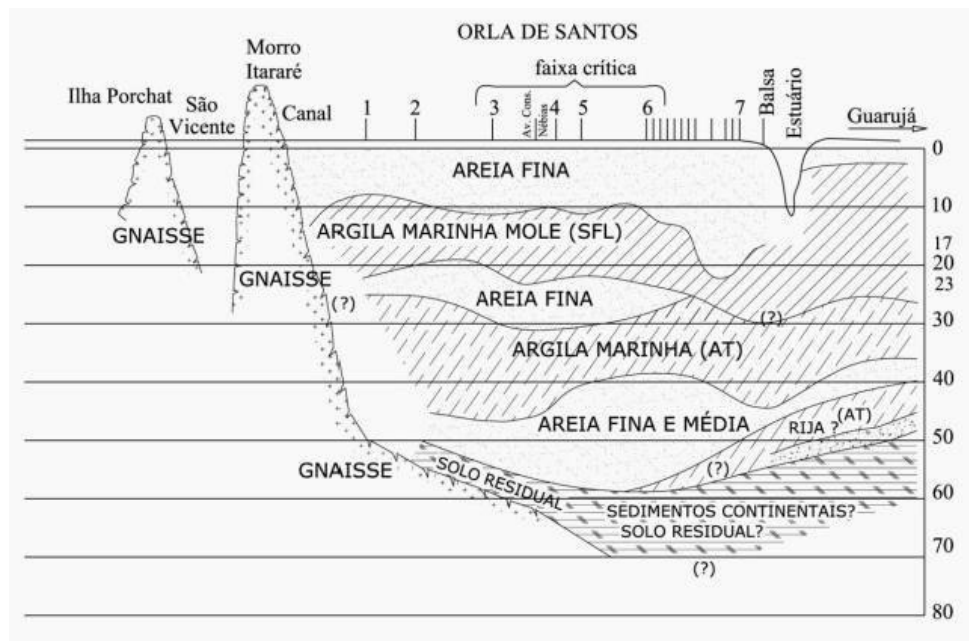
Fonte: adaptado da NBR 6484:2020 (ABNT).

Segundo Da Silva *et al.* (2016) construções executadas sobre solos com baixas capacidades de suporte devem ter duas condições respeitadas: garantir a estabilidade evitando rupturas totais ou parciais das fundações e manutenção das suas deformações verticais e horizontais.

Kempfert e Gebreselassie (2006) afirmam que solos moles são caracterizados pela capacidade de suportar apenas o peso de sobrecarga do solo. Sendo assim, quando esses solos são submetidos às variações de tensão efetiva, eles tendem a sofrer deformações relativamente grandes no decorrer de um longo período de tempo. Ao relacionar a ocorrência do fenômeno em estudo com o tipo de solo, percebe-se que a deformabilidade do solo é um dos fatores influentes para sua ocorrência, dessa forma, estacas cravadas em solos moles, possuem grandes probabilidades de apresentarem problemas, caso dimensionadas sem considerar as características particulares desse tipo de solo.

No Brasil, a orla de Santos, localizada no estado de São Paulo, é famosa pelos prédios “tortos”, construídos entre 1950 e 1960, que apresentam essa característica por terem tido problemas com recalques diferenciais nas fundações, uma vez que essas não foram dimensionadas adequadamente. Segundo Massad (2009), o solo da baixada santista apresenta depósitos de argila marinha entre 20 e 40 metros de profundidade com a camada mais resistente em seguida. Uma vez que o solo da baixada santista é caracterizado como solo mole em suas primeiras camadas, as fundações utilizadas deveriam ser do tipo profunda, no entanto na época optou-se por fundações rasas resultando em sérios problemas de recalques diferenciais.

Figura 1 – Perfil geotécnico sintético da orla praiana de Santos.



Fonte: adaptada de Teixeira (1994) por Massad (2003).

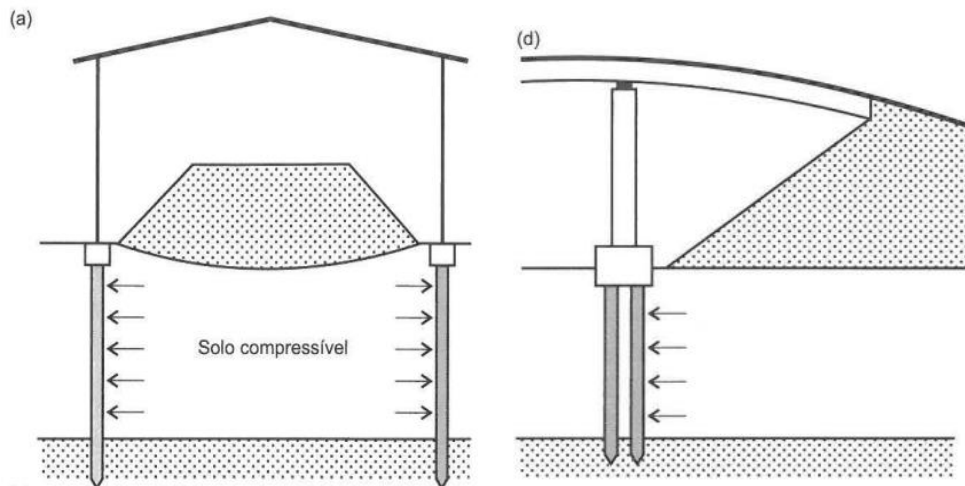
2.3 Efeito Tschebotarioff

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 cravadas 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 Velloso e Lopes (2011), os fatores que mais influenciam na sollicitação lateral de estacas são:

- a) Valor da sobrecarga;
- b) Características da camada compressível;
- c) Fator de segurança à ruptura global;
- d) Distância das estacas à sobrecarga;
- e) Rigidez das estacas;
- f) Geometria do estaqueamento;
- g) Fator tempo.

Figura 2 – Estacas sendo submetidas a esforços horizontais: (a) armazém estaqueado; (d) muro de encontro de pontes.



Fonte: adaptado de VELLOSO & LOPES (2010).

Como pode ser observado na Figura 2 (a) a superfície do terreno de um galpão está sendo solicitada por um carregamento assimétrico de solo, esse carregamento causa deformação no solo que passa a gerar deslocamentos laterais. Por ação dos deslocamentos laterais, estacas nas proximidades tendem a ser submetidas horizontalmente, pois elas atuam como uma barreira impedindo o deslocamento lateral do solo.

Outro caso de ocorrência do efeito Tschebotarioff pode ser observado em obras de aterro de acesso a pontes, Figura 2 (d). Na literatura encontram-se observações de Aoki (1970) que relatou problemas relacionados ao efeito Tschebotarioff em pontes da rodovia litorânea, a BR 101, nos estados do Rio Grande do Norte e Paraíba. Na ocasião foram relatados problemas de desaprumo e fissuras em pilares durante a etapa de terraplenagem de uma das pontes, posteriormente constatou-se que houve um afundamento acentuado do aterro na camada de argila mole.

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).

Dada a natureza mole do solo da região do condomínio (Costa, 2021), resultando em baixa resistência e grandes deformações, e os esforços laterais nas estacas dado a

sobrecarga no terreno pelo aterro um dos blocos do condomínio desabou devido a ruptura das fundações (estacas). De acordo com Costa (2021), duas ações poderiam ter evitado o colapso do condomínio, sendo elas a redução do espaçamento entre as estacas e a construção prévia do aterro.

Segundo Velloso e Lopes (2011), algumas prevenções podem ser tomadas a fim de evitar ou diminuir os efeitos do efeito Tschebotarioff, são elas:

- a) remoção da argila mole caso a camada não seja muito espessa;
- b) melhoria da argila mole por pré-carregamento, com a adição de drenos verticais para acelerar os recalques;
- c) uso de reforço com geogrelhas na base do aterro;
- d) execução de laje estaqueada para receber a sobrecarga;
- e) no caso de aterros, pode-se diminuir a sobrecarga utilizando material com menor peso específico;
- f) utilização de estacas com adequada resistência à flexão, bem como orientadas com seu eixo de maior inércia normal à direção do movimento;
- g) encamisamento, considerando as folgas, das estacas nos trechos sujeitos aos maiores movimentos.

2.4 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. Esse conceito matemático tem várias aplicações na indústria, sendo utilizado principalmente vinculada a inteligências artificiais dada sua velocidade e eficiência na tomada de decisões.

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

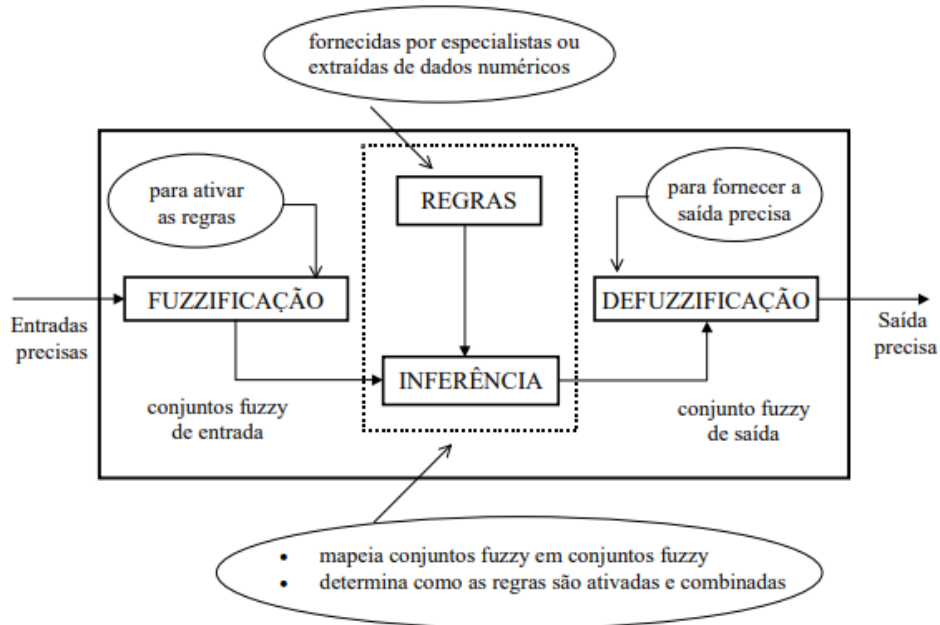
de pertinência. Assim na lógica fuzzy, um elemento que pertence a um conjunto com determinado grau de pertinência pode gerar uma sentença parcialmente verdadeira e parcialmente falsa, (MARRO, *et al.*, 2010).

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.

A base de um sistema de controle fuzzy (Figura 3) no modelo Mamdani é caracterizada pela etapa de fuzzyficação, que recebe as variáveis de entrada e realiza um escalonamento para aplicar as condições necessárias e as transforma em conjuntos fuzzy. Essa etapa consiste em converter os valores numéricos das variáveis de entrada em conjuntos fuzzy correspondentes. As regras são um conjunto de estratégias de controle e suas metas. Dessa forma, as regras de fuzzyficação são os caminhos lógicos que são percorridos pela lógica difusa para analisar uma situação e apontar uma saída com um maior grau de precisão. Essas regras são elaboradas com base nas variáveis de entrada e saída, onde é feita a verificação da melhor função pertinência que se adequa para a análise dos dados em estudo.

O processo de inferência processa os dados fuzzy de entrada junto com as regras, de modo a definir as ações do controle fuzzy. A etapa de defuzzyficação transforma as ações de controle fuzzy inferidas em ações de controle não-fuzzy. Desse modo, esse processo converte os valores em números reais com um conjunto de saída matematicamente definido.

Figura 3 – Sistema de controle fuzzy.



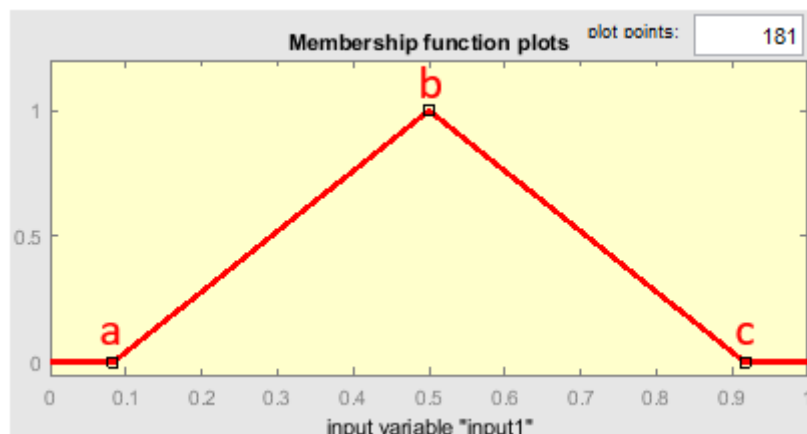
Fonte: TANSCHKEIT (2004).

2.4.1 Funções de pertinência

As funções de pertinência mais aderidas para se trabalhar com conjuntos fuzzy são as triangulares (trimf), as trapezoidais (trapmf) e as gaussianas (gaussmf). Cada uma dessas funções busca associar a máxima pertinência ao valor um e a mínima pertinência ao valor zero. Para este trabalho optou-se por utilizar as funções de pertinência triangulares e trapezoidais.

As funções de pertinência triangulares são formadas por um conjunto ordenado $[a, b, c]$ em que a e c determinam o intervalo dentro do qual a função pertinência assume valores diferentes de zero, e b é o ponto onde a função de pertinência assume o valor máximo.

Figura 4 – Função de pertinência triangular.



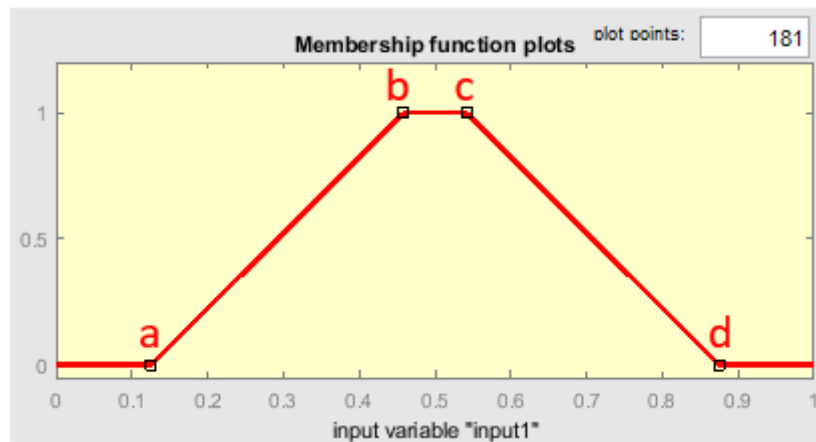
Fonte: autor (2023).

Matematicamente a função pertinência triangular é definida pela equação (1):

$$f_{trimf}(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{se } b < x \leq c \\ 0 & \text{se } x > c \end{cases} \quad (1)$$

As funções de pertinência trapezoidais são formadas por um conjunto ordenado $[a, b, c, d]$, onde a e d determinam o intervalo do qual a função de pertinência assume valores diferentes de zero, e b e c são os pontos pertencentes ao intervalo no qual a função de pertinência é máxima e igual a 1.

Figura 5 – Função de pertinência trapezoidal.



Fonte: autor (2023).

Matematicamente a função pertinência trapezoidal é definida pela equação (2):

$$f_{trapmf}(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a < x \leq b \\ 1 & \text{se } b < x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{se } c < x \leq d \\ 0 & \text{se } x > d \end{cases} \quad (2)$$

2.4.2 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.

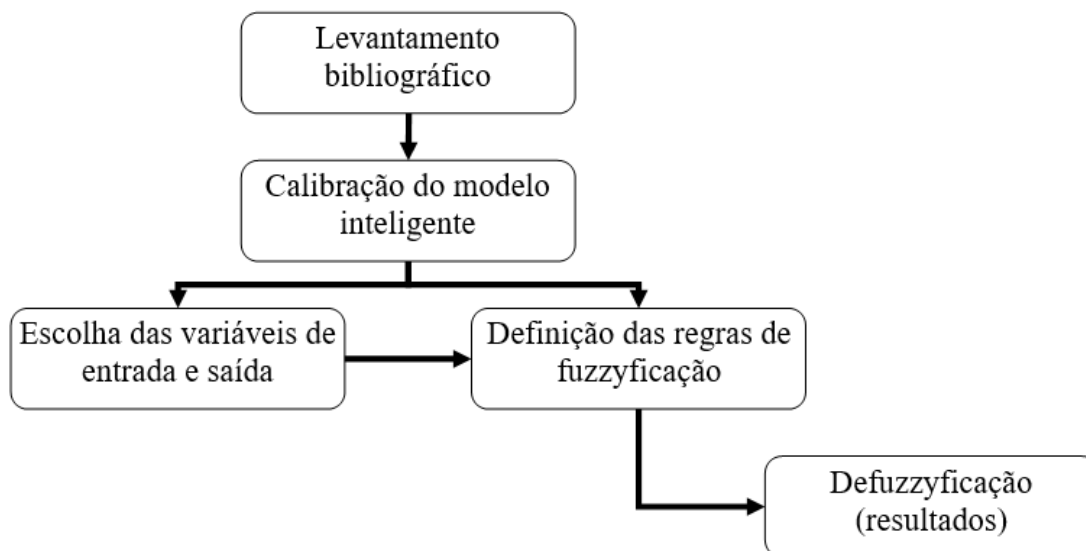
Mohamed, Tarig *et al.* (2012) usou um sistema baseado em lógica difusa para analisar a estabilidade de um talude. Com base em alguns dos parâmetros do talude foram definidas variáveis de entrada e uma variável de saída. As variáveis de entrada adotadas foram o peso unitário do solo, coesão do solo, ângulo e altura do talude e ângulo de atrito interno do talude, já a variável de saída foi definida como o fator de segurança do talude. A interação entre as variáveis gerou um resultado próximo ao desejado para o fator de segurança, concluindo que o sistema fuzzy pode prever com alta precisão a estabilidade do talude, tornando-o uma excelente ferramenta de suporte ao trabalho do engenheiro geotécnico.

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 arterial média do operador e superconsumo de concreto e como variáveis de saída a energia de instalação e a capacidade de carga admissível da estaca.

3 METODOLOGIA

O fluxograma abaixo mostra as etapas da metodologia deste trabalho.

Figura 6 – Fluxograma das etapas da metodologia.



Fonte: autor (2023).

3.1 Levantamento bibliográfico

A etapa inicial dessa pesquisa se deu pela procura em repositórios nacionais e internacionais por trabalhos realizados na mesma linha de pesquisa, objetivando ver o que já foi feito e o que poderia ser melhorado. Muitos estudiosos propuseram formas de analisar e gerar soluções para os problemas gerados pelo efeito Tschebotarioff, existe na literatura diversas formas de se estudar esse fenômeno, seja por soluções numéricas, analíticas ou computacionais por meio de softwares específicos.

Como a ideia inicial da pesquisa era utilizar a lógica difusa para identificar os fatores que mais influenciam na ocorrência do fenômeno em estudo, foram realizadas pesquisas em diversas fontes para verificar se algum trabalho já havia sido feito com base nessa linha de pesquisa. As palavras ou termos chaves mais utilizados para as buscas foram: “Tschebotarioff”; “soft soil” e “fuzzy logic”.

Por fim, não foram encontrados trabalhos utilizando a lógica difusa para estudar o efeito Tschebotarioff, assim, tornou-se viável dar continuidade a este trabalho, apesar da falta de referências externas.

3.2 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 2 apresenta as variáveis de entrada e saída determinadas para o fenômeno estudado.

Tabela 2 – Variáveis de entrada e saída.

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

Fonte: autor (2023).

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 3.

Tabela 3 – Valores mínimos e máximos das variáveis de entrada e saída.

Variáveis (E. Tschebotarioff)	Valores	
	Mínimos	Máximos
Carregamento (aterro)	0	18 kN/m ³
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

Fonte: autor (2023).

3.3 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 7.

Figura 7 – Exemplificação das regras adotadas.

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

Fonte: autor (2023).

3.4 Calibração do modelo inteligente

Após determinar os dados de entrada e saída e as regras de fuzzyficação foi utilizada a função *Fuzzy Logic Toolbox*, do software MATLAB[®] para fazer todo o processamento do sistema de controle fuzzy e por fim gerar os resultados esperados. Optou-se por utilizar o MATLAB[®] pelo fato de o software ser muito versátil ao trabalhar com operações matemáticas presentes na engenharia e por seus recursos gráficos essenciais para a calibração do modelo.

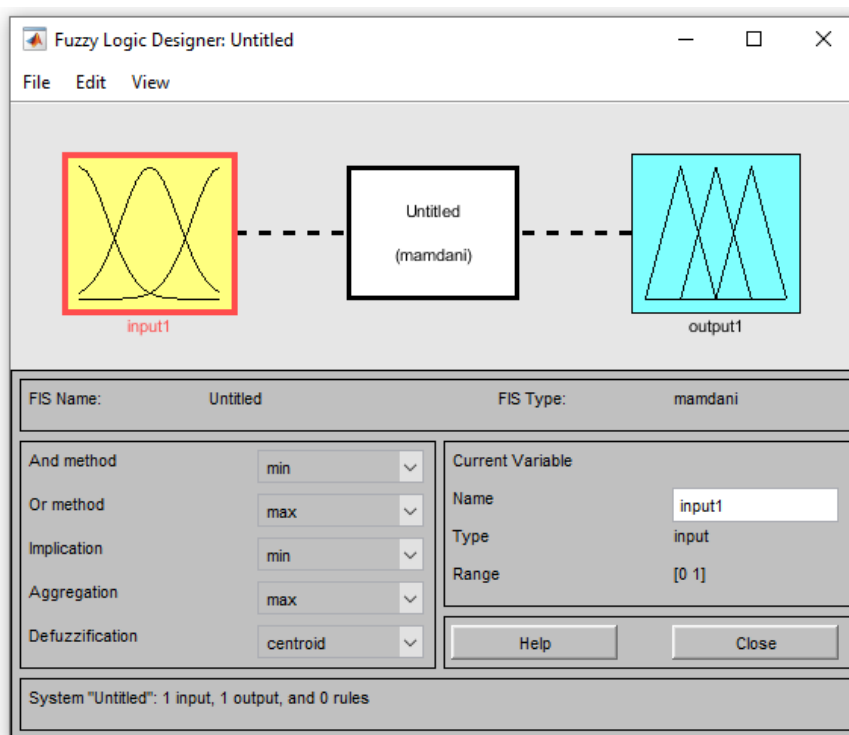
Tabela 4 – Intervalos das variáveis e termos linguísticos.

	Variável	Razão	Intervalo	Termo Linguístico
Entrada	Carregamento (kN)	0,25C	0 – 4,5	Muito baixo
		0,50C	4,5 - 9	Baixo
		0,75C	9 – 13,5	Médio
		1C	13,5 - 18	Alto
	Módulo de deformabilidade do solo (MPa)	-	0 – 10	Baixo
		-	10 – 20	Médio
		-	20 – 30	Alto
	Rigidez da estaca (GPa)	0,25RE	0 – 50	Muito Baixa
		0,50RE	50 – 100	Baixa
		0,75RE	100 – 150	Média
		1RE	150 – 200	Alta
	Distância do carregamento (m)	-	0 – 6	Muito perto
		-	6 – 12	Perto
		-	12 – 18	Mediano
-		18 – 24	Longe	
-		24 – 30	Muito Longe	
Saída	Esforços de flexão (kN.m)	0,25EF	0 – 40	Baixo
		0,50EF	40 – 80	Médio
		0,75EF	80 – 120	Alto
		1EF	120 – 160	Muito Alto

Fonte: autor (2023).

Por meio da *ToolBox, Fuzzy Inference System* (FIS) foi possível produzir o modelo fuzzy, que é composto por um conjunto de transformadores difusos (variáveis linguísticas), funções de pertinência (Membership functions - MFs) e por uma cadeia de regras, que após o processo de defuzzyficação possibilita a visualização da variável de saída em termos numéricos em vez de quantitativos. A interface inicial da ferramenta é demonstrada na Figura 8, essa ferramenta pode ser acessada digitando o código “fuzzy” no campo de comandos do MATLAB®.

Figura 8 – Interface inicial da função Fuzzy Logic Toolbox.



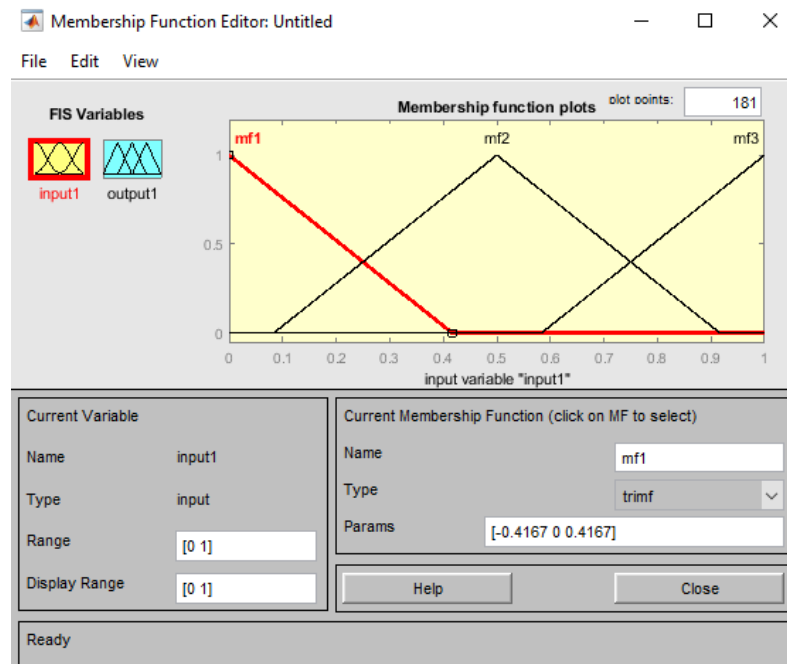
Fonte: autor (2023).

Já na interface inicial do sistema é possível adicionar as variáveis de entrada, por meio do campo *input*, e de saída pelo campo *output*. As regras de fuzzyficação já determinadas anteriormente podem ser adicionadas no campo *Rules*, que leva em consideração o modelo fuzzy adotado, Mamdani ou Sugeno, por padrão a ferramenta inicia com o modelo Mamdani, mas é possível alterar para o modelo Sugeno.

A calibração do modelo inteligente foi feita utilizando o método Mamdani, uma vez que o mesmo apresenta uma função de associação de saída, item desejável para esse trabalho. O método também inclui módulos de interface que transformam as variáveis de entrada em conjuntos difusos, e os conjuntos difusos gerados na saída em grandezas numéricas proporcionais.

Com a definição do método, foram adicionadas as variáveis de entrada e saída, bem como as regras de fuzzyficação, as Figuras 9, 10 e 11 demonstram essas etapas.

Figura 9 – Campo inicial de edição das variáveis.

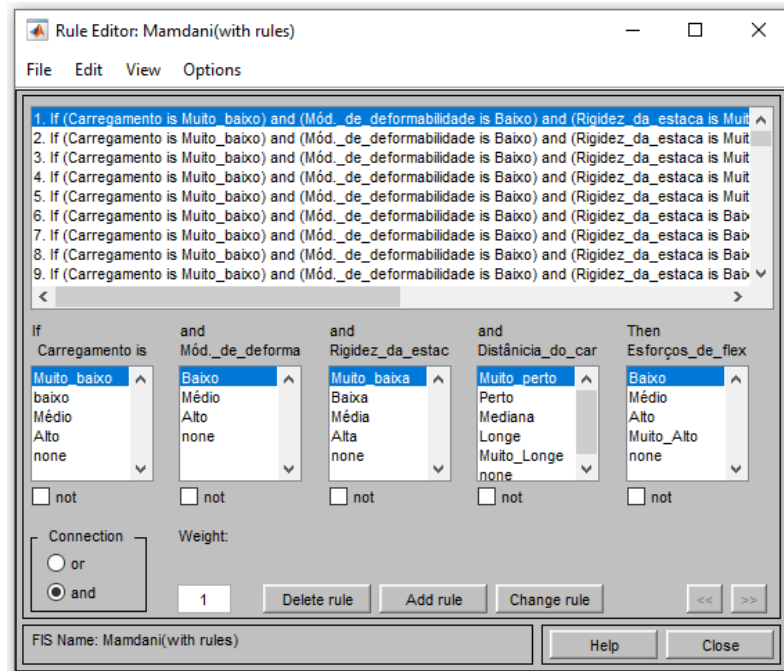


Fonte: autor (2023).

Após inserir as variáveis, é necessário informar ao sistema as características de cada variável, que foram estabelecidas preliminarmente. Assim, foram adicionados os valores máximos de cada variável, adicionando o intervalo de valores que essa variável pode assumir, representado no sistema pelo *Range*, bem como o intervalo que representa cada termo linguístico associado às variáveis. Também nesse campo, é adicionado o tipo de função de pertinência adequada para as variáveis, no caso deste trabalho optou-se por utilizar combinações entre as funções pertinência trapezoidal (*trapmf*) e triangular (*trimf*).

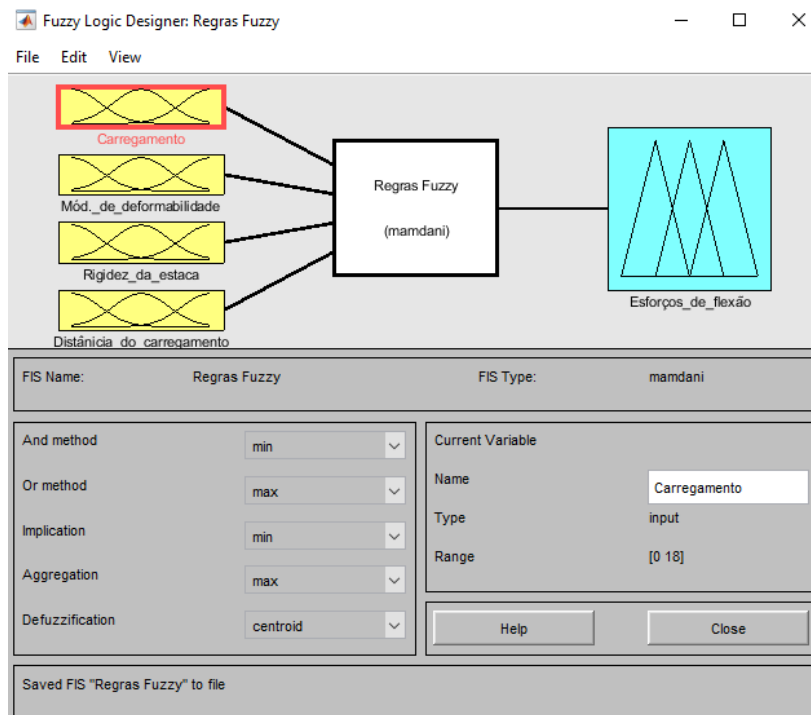
Para adicionar as regras basta selecionar a opção *Rules* e ir adicionando manualmente as combinações entre as variáveis de entrada que resultaram em uma saída final, conforme foi estabelecido nas regras de fuzzyficação (Figura 7).

Figura 10 – Campo de adição e edição das regras de fuzzyficação.



Fonte: autor (2023).

Figura 11 – Interface inicial com as variáveis de entrada e saída e regras de fuzzyficação.

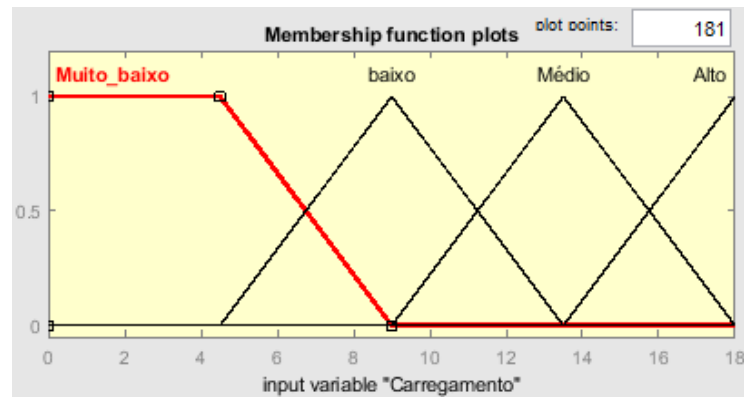


Fonte: autor (2023).

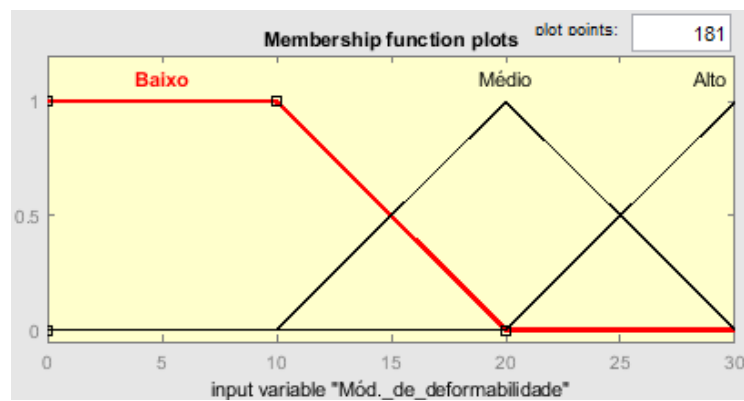
A Figura 12 demonstra os intervalos de pertinência das variáveis de entrada e da variável de saída, bem como as funções de pertinência, triangular e trapezoidal, utilizadas.

Figura 12 – Condições para as variáveis: (a) Carregamento; (b) Módulo de deformabilidade; (c) Rigidez da estaca; (d) Distância do carregamento; (e) Esforços de flexão.

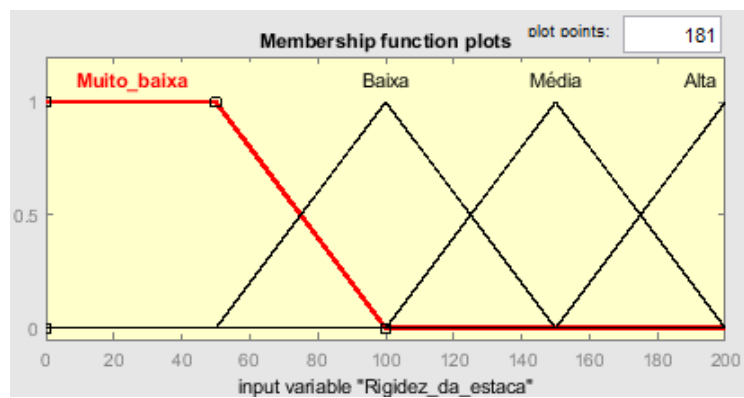
(a)



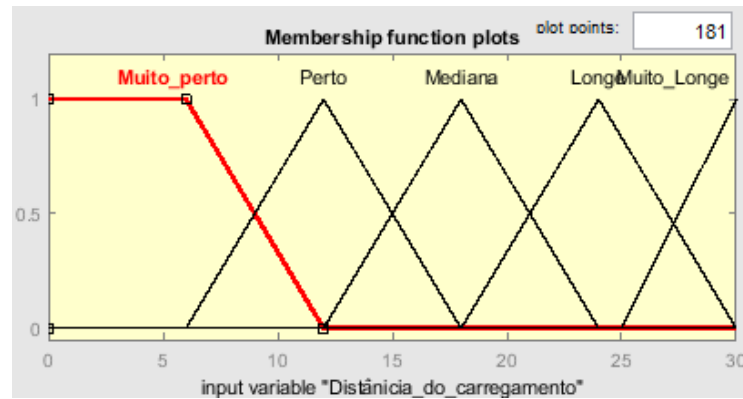
(b)



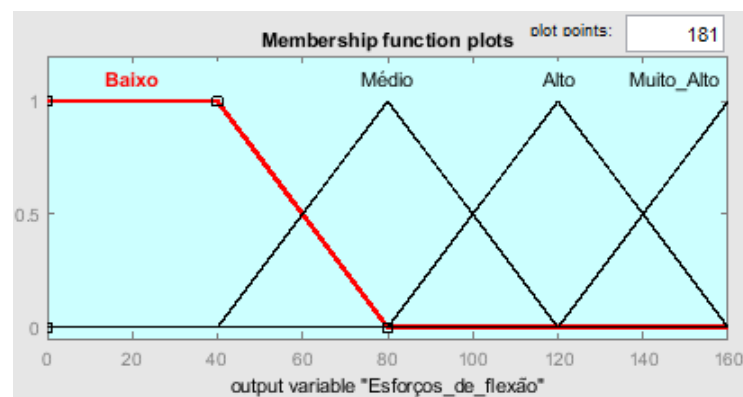
(c)



(d)



(e)



Fonte: autor (2023).

O modelo de lógica fuzzy utilizado para o estudo da suscetibilidade ao efeito Tschebotarioff utilizado neste trabalho é composto por quatro partes: fuzzyficador, base de regras fuzzy, área de inferência e o defuzzyficador. Sendo assim, o fuzzyficador tem por função a transformação dos valores determinísticos de entrada em valores fuzzy. A base de regras fuzzy representa a noção do problema conforme um conjunto de regras da forma: se-então. A área de inferência relaciona as variáveis fuzzy de entrada e saída. E por último, o defuzzyficador converte os valores fuzzy de saída em valores determinísticos.

3.5 Processamento dos dados (Defuzzyficação) e obtenção dos resultados

Por fim, após a calibração do modelo fuzzy responsável por analisar a suscetibilidade ao efeito Tschebotarioff, foi feita a defuzzyficação onde se obteve os resultados em valores determinísticos, que podem ser analisados pela função *Rule* no campo *View*, e a modelagem gráfica que representa todos os resultados conforme as condições estabelecidas, que pode ser acessada pela função *Surface* também no campo *View*.

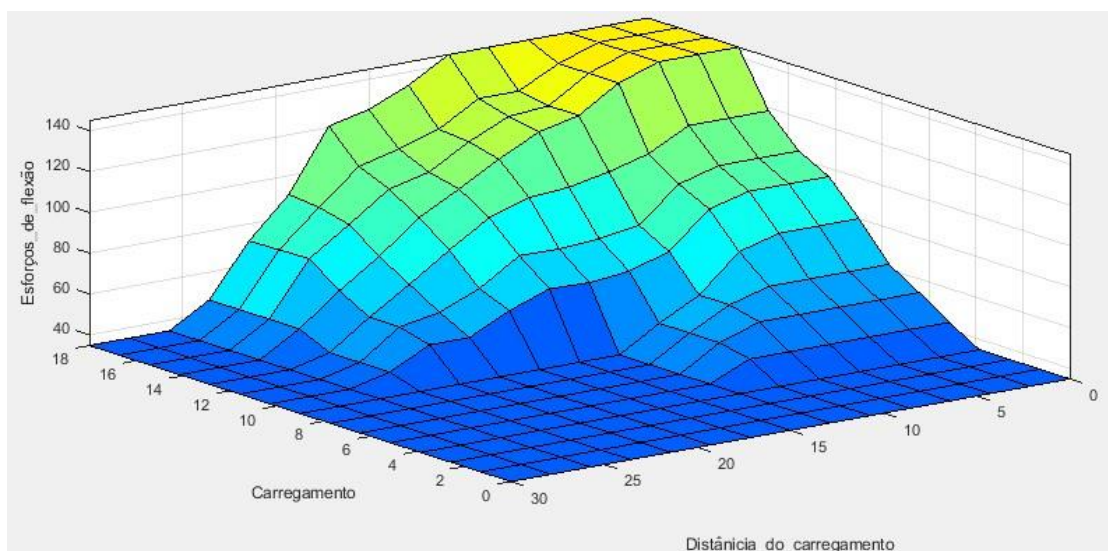
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos ao aplicar o modelo em lógica fuzzy para estudo da suscetibilidade ao efeito Tschebotarioff em estacas cravadas em solos moles. Além disso, os resultados encontrados são discutidos a frente e comparados com trabalhos semelhantes disponíveis na literatura, a fim de se obter conclusões significativas para o trabalho.

4.1 Esforços de flexão nas estacas

Na figura 13 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 13 – Variação Distância do carregamento à estaca x Carregamento (aterro) x Esforços de flexão na estaca.



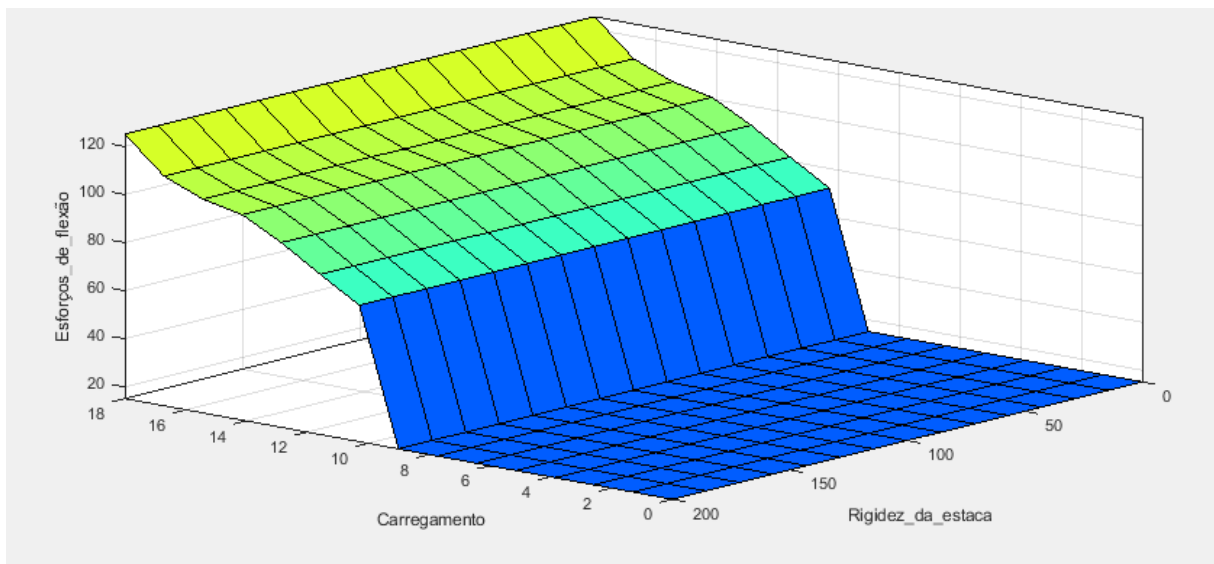
Fonte: autor (2023).

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 14 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.

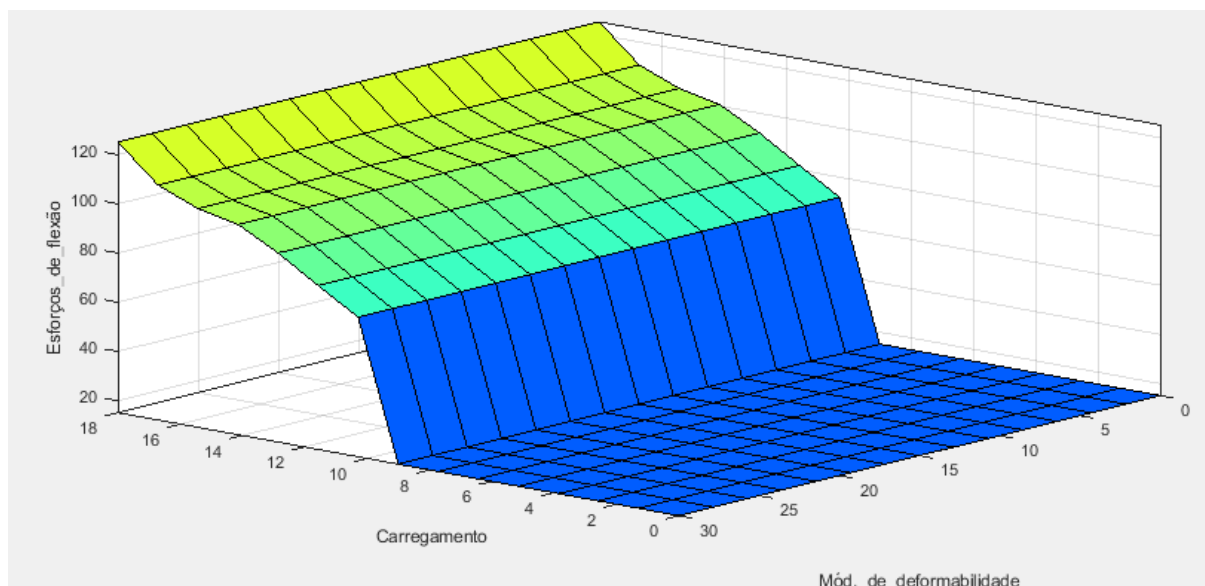
Na figura 15 apresentam-se no eixo x, o módulo de deformabilidade do solo, no eixo y, o carregamento (representado pelo aterro), e no eixo z, os esforços de flexão na estaca. Nota-se que nessa situação o módulo de deformabilidade do solo não apresentou relação direta com o carregamento, visto que o esforço de flexão na estaca tende a aumentar devido apenas ao aumento da parcela de carregamento.

Figura 14 – Variação Rigidez da estaca x Carregamento (aterro) x Esforços de flexão na estaca.



Fonte: autor (2023).

Figura 15 – Variação Módulo de deformabilidade do solo x Carregamento (aterro) x Esforços de flexão na estaca.



Fonte: autor (2023).

Ao comparar os resultados mostrados nas figuras 14 e 15, 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 kN/m³. Assim, mesmo considerando padrões de rigidez e deformabilidade adequados, estacas cravadas 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. CONCLUSÃO

5.1 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 cravadas 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 muito 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 a 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 preposição 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 conseqüentemente 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.

5.2 Sugestões de trabalhos futuros

Como sugestão para trabalho futuros, envolvendo o efeito Tschebotarioff e fenômenos semelhantes, têm-se:

- Avaliar condição tridimensional de carregamento;
- Utilizar outras funções de pertinência e avaliar os resultados;
- Avaliar também os deslocamentos horizontais nas estacas;
- Utilizar a mesma metodologia para estudo da suscetibilidade ao atrito negativo em estacas cravadas em solos moles

REFERÊNCIAS

- 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.
- BOUMEZERANE, Djemalddine M.; BELKACEMI, Smain; ŽLENDER, Bojan. **Fuzzy-sets decision-support system for geotechnical site soundings**. Acta Geotechnica Slovenica, v. 8, n. 1, p. 51-63, 2011.
- 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.
- COSTA, Marcela Marques Camargo. **Modelação de fundações profundas sob solicitação horizontal devida a deslocamento do terreno**. 2021.
- DA SILVA, F. K., MAZZUCO, L. P., MOREIRA, L. F., MACEDO, E., GODOI, C. S., & DA SILVA Espindola, F. (2016). **Tratamento Geotécnico de Solos Moles com a Técnica Consolidação Profunda Radial (CPR) em Obra de Ampliação Portuária**.
- 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.
- KEMPFERT, Hans-Georg; GEBRESELASSIE, Berhane. **Excavations and foundations in soft soils**. Springer Science & Business Media, 2006.
- 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.

MASSAD, Façal. **Características geotécnicas dos solos da Baixada Santista, com ênfase na Cidade de Santos. Passado, presente e futuro dos edifícios da Orla Marítima de Santos**, 2003.

MASSAD, Façal. **Solos Marinhos da Baixada Santista: características e propriedades geotécnicas**. Oficina de Textos, 2009.

MASSAD, F. Obras de Terra: **Curso Básico de Geotecnia**. São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 2010, 2ª Edição, 216p.

MILITITSKY, Jarbas; CONSOLI, Nilo Cesar; SCHNAID, Fernando. **Patologia das fundações**. Oficina de textos, 2015.

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.

MOREIRA, Leonardo Fiorentin; MAZZUCO, Leonardo Pandini. **TRATAMENTO GEOTÉCNICO DE SOLOS MOLES COM A TÉCNICA CONSOLIDAÇÃO PROFUNDA RADIAL (CPR), EM OBRA PORTUÁRIA**. 2015. 114 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2015.

KEMPFERT, Hans-Georg; GEBRESELASSIE, Berhane. **Excavations and foundations in soft soils**. Springer Science & Business Media, 2006.

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.

SOUZA, Eduardo Gimenez de. **Colapso de edifício por ruptura das estacas: estudo das causas e da recuperação**. 2003. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

TANSCHUIT, Ricardo. Sistemas fuzzy. **Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro**, p. 338-353, 2004.

TERZAGHI, Karl; PECK, RALPH B. Soil mechanics. **Engineering Practice. John Wiley and Sons, Inc., New York**, 1948.

TSCHEBOTARIOFF, Gregory P. **Retaining structures**. McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, NY, 1962.

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 Pfähle 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.

ANEXO 1 – DEFINIÇÃO DAS REGRAS DE FUZZIFICAÇÃO

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
11	Muito baixo	Baixo	Média	Muito perto	Baixo
12	Muito baixo	Baixo	Média	Perto	Baixo
13	Muito baixo	Baixo	Média	Mediana	Baixo
14	Muito baixo	Baixo	Média	Longe	Baixo
15	Muito baixo	Baixo	Média	Muito longe	Baixo
16	Muito baixo	Baixo	Alta	Muito perto	Baixo
17	Muito baixo	Baixo	Alta	Perto	Baixo
18	Muito baixo	Baixo	Alta	Mediana	Baixo
19	Muito baixo	Baixo	Alta	Longe	Baixo
20	Muito baixo	Baixo	Alta	Muito longe	Baixo
21	Muito baixo	Médio	Muito baixa	Muito perto	Baixo
22	Muito baixo	Médio	Muito baixa	Perto	Baixo
23	Muito baixo	Médio	Muito baixa	Mediana	Baixo
24	Muito baixo	Médio	Muito baixa	Longe	Baixo
25	Muito baixo	Médio	Muito baixa	Muito longe	Baixo
26	Muito baixo	Médio	Baixa	Muito perto	Baixo
27	Muito baixo	Médio	Baixa	Perto	Baixo
28	Muito baixo	Médio	Baixa	Mediana	Baixo
29	Muito baixo	Médio	Baixa	Longe	Baixo
30	Muito baixo	Médio	Baixa	Muito longe	Baixo
31	Muito baixo	Médio	Média	Muito perto	Baixo
32	Muito baixo	Médio	Média	Perto	Baixo
33	Muito baixo	Médio	Média	Mediana	Baixo
34	Muito baixo	Médio	Média	Longe	Baixo
35	Muito baixo	Médio	Média	Muito longe	Baixo
36	Muito baixo	Médio	Alta	Muito perto	Baixo
37	Muito baixo	Médio	Alta	Perto	Baixo
38	Muito baixo	Médio	Alta	Mediana	Baixo
39	Muito baixo	Médio	Alta	Longe	Baixo
40	Muito baixo	Médio	Alta	Muito longe	Baixo

41	Muito baixo	Alto	Muito baixa	Muito perto	Baixo
42	Muito baixo	Alto	Muito baixa	Perto	Baixo
43	Muito baixo	Alto	Muito baixa	Mediana	Baixo
44	Muito baixo	Alto	Muito baixa	Longe	Baixo
45	Muito baixo	Alto	Muito baixa	Muito longe	Baixo
46	Muito baixo	Alto	Baixa	Muito perto	Baixo
47	Muito baixo	Alto	Baixa	Perto	Baixo
48	Muito baixo	Alto	Baixa	Mediana	Baixo
49	Muito baixo	Alto	Baixa	Longe	Baixo
50	Muito baixo	Alto	Baixa	Muito longe	Baixo
51	Muito baixo	Alto	Média	Muito perto	Baixo
52	Muito baixo	Alto	Média	Perto	Baixo
53	Muito baixo	Alto	Média	Mediana	Baixo
54	Muito baixo	Alto	Média	Longe	Baixo
55	Muito baixo	Alto	Média	Muito longe	Baixo
56	Muito baixo	Alto	Alta	Muito perto	Baixo
57	Muito baixo	Alto	Alta	Perto	Baixo
58	Muito baixo	Alto	Alta	Mediana	Baixo
59	Muito baixo	Alto	Alta	Longe	Baixo
60	Muito baixo	Alto	Alta	Muito longe	Baixo
61	Baixo	Baixo	Muito baixa	Muito perto	Médio
62	Baixo	Baixo	Muito baixa	Perto	Baixo
63	Baixo	Baixo	Muito baixa	Mediana	Baixo
64	Baixo	Baixo	Muito baixa	Longe	Baixo
65	Baixo	Baixo	Muito baixa	Muito longe	Baixo
66	Baixo	Baixo	Baixa	Muito perto	Médio
67	Baixo	Baixo	Baixa	Perto	Baixo
68	Baixo	Baixo	Baixa	Mediana	Baixo
69	Baixo	Baixo	Baixa	Longe	Baixo
70	Baixo	Baixo	Baixa	Muito longe	Baixo
71	Baixo	Baixo	Média	Muito perto	Médio
72	Baixo	Baixo	Média	Perto	Baixo
73	Baixo	Baixo	Média	Mediana	Baixo
74	Baixo	Baixo	Média	Longe	Baixo
75	Baixo	Baixo	Média	Muito longe	Baixo
76	Baixo	Baixo	Alta	Muito perto	Médio
77	Baixo	Baixo	Alta	Perto	Baixo
78	Baixo	Baixo	Alta	Mediana	Baixo
79	Baixo	Baixo	Alta	Longe	Baixo
80	Baixo	Baixo	Alta	Muito longe	Baixo
81	Baixo	Médio	Muito baixa	Muito perto	Médio
82	Baixo	Médio	Muito baixa	Perto	Baixo
83	Baixo	Médio	Muito baixa	Mediana	Baixo
84	Baixo	Médio	Muito baixa	Longe	Baixo
85	Baixo	Médio	Muito baixa	Muito longe	Baixo

86	Baixo	Médio	Baixa	Muito perto	Médio
87	Baixo	Médio	Baixa	Perto	Baixo
88	Baixo	Médio	Baixa	Mediana	Baixo
89	Baixo	Médio	Baixa	Longe	Baixo
90	Baixo	Médio	Baixa	Muito longe	Baixo
91	Baixo	Médio	Média	Muito perto	Médio
92	Baixo	Médio	Média	Perto	Baixo
93	Baixo	Médio	Média	Mediana	Baixo
94	Baixo	Médio	Média	Longe	Baixo
95	Baixo	Médio	Média	Muito longe	Baixo
96	Baixo	Médio	Alta	Muito perto	Médio
97	Baixo	Médio	Alta	Perto	Baixo
98	Baixo	Médio	Alta	Mediana	Baixo
99	Baixo	Médio	Alta	Longe	Baixo
100	Baixo	Médio	Alta	Muito longe	Baixo
101	Baixo	Alto	Muito baixa	Muito perto	Médio
102	Baixo	Alto	Muito baixa	Perto	Baixo
103	Baixo	Alto	Muito baixa	Mediana	Baixo
104	Baixo	Alto	Muito baixa	Longe	Baixo
105	Baixo	Alto	Muito baixa	Muito longe	Baixo
106	Baixo	Alto	Baixa	Muito perto	Médio
107	Baixo	Alto	Baixa	Perto	Baixo
108	Baixo	Alto	Baixa	Mediana	Baixo
109	Baixo	Alto	Baixa	Longe	Baixo
110	Baixo	Alto	Baixa	Muito longe	Baixo
111	Baixo	Alto	Média	Muito perto	Médio
112	Baixo	Alto	Média	Perto	Baixo
113	Baixo	Alto	Média	Mediana	Baixo
114	Baixo	Alto	Média	Longe	Baixo
115	Baixo	Alto	Média	Muito longe	Baixo
116	Baixo	Alto	Alta	Muito perto	Médio
117	Baixo	Alto	Alta	Perto	Baixo
118	Baixo	Alto	Alta	Mediana	Baixo
119	Baixo	Alto	Alta	Longe	Baixo
120	Baixo	Alto	Alta	Muito longe	Baixo
121	Médio	Baixo	Muito baixa	Muito perto	Muito alto
122	Médio	Baixo	Muito baixa	Perto	Alto
123	Médio	Baixo	Muito baixa	Mediana	Médio
124	Médio	Baixo	Muito baixa	Longe	Baixo
125	Médio	Baixo	Muito baixa	Muito longe	Baixo
126	Médio	Baixo	Baixa	Muito perto	Muito alto
127	Médio	Baixo	Baixa	Perto	Alto
128	Médio	Baixo	Baixa	Mediana	Médio
129	Médio	Baixo	Baixa	Longe	Baixo
130	Médio	Baixo	Baixa	Muito longe	Baixo

131	Médio	Baixo	Média	Muito perto	Muito alto
132	Médio	Baixo	Média	Perto	Alto
133	Médio	Baixo	Média	Mediana	Médio
134	Médio	Baixo	Média	Longe	Baixo
135	Médio	Baixo	Média	Muito longe	Baixo
136	Médio	Baixo	Alta	Muito perto	Muito alto
137	Médio	Baixo	Alta	Perto	Alto
138	Médio	Baixo	Alta	Mediana	Médio
139	Médio	Baixo	Alta	Longe	Baixo
140	Médio	Baixo	Alta	Muito longe	Baixo
141	Médio	Médio	Muito baixa	Muito perto	Muito alto
142	Médio	Médio	Muito baixa	Perto	Alto
143	Médio	Médio	Muito baixa	Mediana	Médio
144	Médio	Médio	Muito baixa	Longe	Baixo
145	Médio	Médio	Muito baixa	Muito longe	Baixo
146	Médio	Médio	Baixa	Muito perto	Muito alto
147	Médio	Médio	Baixa	Perto	Alto
148	Médio	Médio	Baixa	Mediana	Médio
149	Médio	Médio	Baixa	Longe	Baixo
150	Médio	Médio	Baixa	Muito longe	Baixo
151	Médio	Médio	Média	Muito perto	Muito alto
152	Médio	Médio	Média	Perto	Alto
153	Médio	Médio	Média	Mediana	Médio
154	Médio	Médio	Média	Longe	Baixo
155	Médio	Médio	Média	Muito longe	Baixo
156	Médio	Médio	Alta	Muito perto	Muito alto
157	Médio	Médio	Alta	Perto	Alto
158	Médio	Médio	Alta	Mediana	Médio
159	Médio	Médio	Alta	Longe	Baixo
160	Médio	Médio	Alta	Muito longe	Baixo
161	Médio	Alto	Muito baixa	Muito perto	Muito alto
162	Médio	Alto	Muito baixa	Perto	Alto
163	Médio	Alto	Muito baixa	Mediana	Médio
164	Médio	Alto	Muito baixa	Longe	Baixo
165	Médio	Alto	Muito baixa	Muito longe	Baixo
166	Médio	Alto	Baixa	Muito perto	Muito alto
167	Médio	Alto	Baixa	Perto	Alto
168	Médio	Alto	Baixa	Mediana	Médio
169	Médio	Alto	Baixa	Longe	Baixo
170	Médio	Alto	Baixa	Muito longe	Baixo
171	Médio	Alto	Média	Muito perto	Muito alto
172	Médio	Alto	Média	Perto	Alto
173	Médio	Alto	Média	Mediana	Médio
174	Médio	Alto	Média	Longe	Baixo
175	Médio	Alto	Média	Muito longe	Baixo

176	Médio	Alto	Alta	Muito perto	Muito alto
177	Médio	Alto	Alta	Perto	Alto
178	Médio	Alto	Alta	Mediana	Médio
179	Médio	Alto	Alta	Longe	Baixo
180	Médio	Alto	Alta	Muito longe	Baixo
181	Alto	Baixo	Muito baixa	Muito perto	Muito alto
182	Alto	Baixo	Muito baixa	Perto	Muito alto
183	Alto	Baixo	Muito baixa	Mediana	Alto
184	Alto	Baixo	Muito baixa	Longe	Baixo
185	Alto	Baixo	Muito baixa	Muito longe	Baixo
186	Alto	Baixo	Baixa	Muito perto	Muito alto
187	Alto	Baixo	Baixa	Perto	Muito alto
188	Alto	Baixo	Baixa	Mediana	Alto
189	Alto	Baixo	Baixa	Longe	Baixo
190	Alto	Baixo	Baixa	Muito longe	Baixo
191	Alto	Baixo	Média	Muito perto	Muito alto
192	Alto	Baixo	Média	Perto	Muito alto
193	Alto	Baixo	Média	Mediana	Alto
194	Alto	Baixo	Média	Longe	Baixo
195	Alto	Baixo	Média	Muito longe	Baixo
196	Alto	Baixo	Alta	Muito perto	Muito alto
197	Alto	Baixo	Alta	Perto	Muito alto
198	Alto	Baixo	Alta	Mediana	Alto
199	Alto	Baixo	Alta	Longe	Baixo
200	Alto	Baixo	Alta	Muito longe	Baixo
201	Alto	Médio	Muito baixa	Muito perto	Muito alto
202	Alto	Médio	Muito baixa	Perto	Muito alto
203	Alto	Médio	Muito baixa	Mediana	Alto
204	Alto	Médio	Muito baixa	Longe	Baixo
205	Alto	Médio	Muito baixa	Muito longe	Baixo
206	Alto	Médio	Baixa	Muito perto	Muito alto
207	Alto	Médio	Baixa	Perto	Muito alto
208	Alto	Médio	Baixa	Mediana	Alto
209	Alto	Médio	Baixa	Longe	Baixo
210	Alto	Médio	Baixa	Muito longe	Baixo
211	Alto	Médio	Média	Muito perto	Muito alto
212	Alto	Médio	Média	Perto	Muito alto
213	Alto	Médio	Média	Mediana	Alto
214	Alto	Médio	Média	Longe	Baixo
215	Alto	Médio	Média	Muito longe	Baixo
216	Alto	Médio	Alta	Muito perto	Muito alto
217	Alto	Médio	Alta	Perto	Muito alto
218	Alto	Médio	Alta	Mediana	Alto
219	Alto	Médio	Alta	Longe	Baixo
220	Alto	Médio	Alta	Muito longe	Baixo

221	Alto	Alto	Muito baixa	Muito perto	Muito alto
222	Alto	Alto	Muito baixa	Perto	Muito alto
223	Alto	Alto	Muito baixa	Mediana	Alto
224	Alto	Alto	Muito baixa	Longe	Baixo
225	Alto	Alto	Muito baixa	Muito longe	Baixo
226	Alto	Alto	Baixa	Muito perto	Muito alto
227	Alto	Alto	Baixa	Perto	Muito alto
228	Alto	Alto	Baixa	Mediana	Alto
229	Alto	Alto	Baixa	Longe	Baixo
230	Alto	Alto	Baixa	Muito longe	Baixo
231	Alto	Alto	Média	Muito perto	Muito alto
232	Alto	Alto	Média	Perto	Muito alto
233	Alto	Alto	Média	Mediana	Alto
234	Alto	Alto	Média	Longe	Baixo
235	Alto	Alto	Média	Muito longe	Baixo
236	Alto	Alto	Alta	Muito perto	Muito alto
237	Alto	Alto	Alta	Perto	Muito alto
238	Alto	Alto	Alta	Mediana	Alto
239	Alto	Alto	Alta	Longe	Baixo
240	Alto	Alto	Alta	Muito longe	Baixo